

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

**PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DEL
SECTOR INDUSTRIAL DE SAN LUIS POTOSÍ: PROYECCIÓN AL 2020 Y
PROPUESTA DE MITIGACIÓN**

PRESENTA:

M.C. MARÍA TERESA GUTIÉRREZ ESCAJEDA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. PEDRO MEDELLÍN MILÁN

ASESORES:

DR. JOSÉ ANTONIO ÁVALOS LOZANO

DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA

ENERO 2015



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DEL
SECTOR INDUSTRIAL DE SAN LUIS POTOSÍ: PROYECCIÓN AL 2020 Y
PROPUESTA DE MITIGACIÓN

PRESENTA:

M.C. MARÍA TERESA GUTIÉRREZ ESCAJEDA

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: DR. PEDRO MEDELLÍN MILÁN

ASESOR: DR. JOSÉ ANTONIO ÁVALOS LOZANO

ASESOR: DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA

SINODALES:

PRESIDENTE: DR. PEDRO MEDELLÍN MILÁN

SECRETARIO: DR. JOSÉ ANTONIO ÁVALOS LOZANO

VOCAL 1: DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA

VOCAL 2: DR. MARCOS ALGARA SILLER

VOCAL 3: DR. NOÉ AGUILAR RIVERA

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

AGENDA AMBIENTAL

CON FINANCIAMIENTO DE:

SEMARNAT-CONACYT CONVENIO No. 108120

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**PROGRAMA DE ACCIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE SAN
LUIS POTOSÍ**

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 372134

**EL DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO A TRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

Agradecimientos Institucionales

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por brindarme la oportunidad para ser parte de su comunidad estudiantil en el doctorado del PMPCA.

Al PMPCA, Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales, por recibirme y formarme como Doctora en Ciencias Ambientales.

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado en la UASLP. Número de registro 372134.

Al personal de la Coordinación de la Agenda Ambiental, por la disposición y los múltiples apoyos recibidos en el proceso.

Al proyecto SEMARNAT/CONACYT, convenio: 108120, por los recursos para el desarrollo del trabajo.

A la DGEST, a través del Instituto Tecnológico de Delicias, por apoyarme para continuar con mi formación como profesora.

Dedicatorias

A esas tres personitas que han compartido su vida conmigo desde que nacieron, les dedico este doctorado; este logro es compartido hijos. Les agradezco en general por haber estado conmigo en este proceso, y en particular:

Javy, por tu nobleza, tolerancia y amor incondicional a tus hermanos y a Mí, que fueron de gran ayuda en esta experiencia; por tu sensibilidad que siempre estuvo presente, y esa comprensión que siempre me has brindado.

Mikey, por tu presencia incondicional, por tu aprehensión en el orden y tu proactividad, que fueron de gran ayuda; por comprenderme en mis distintas facetas, y por tu gran empatía y sensibilidad al valorar mis proyectos.

Andrea, por profesarme tu amor a través de las cosas y gustos que compartimos: la poesía, las canciones de amor, la admiración por los paisajes. Por tu objetividad ante los problemas, que muchas veces me hicieron redimensionar el sentido e importancia de las cosas; y gracias princesa, por animarme a seguir soñando.

A mis padres, por haberme acompañado de lejos en esta experiencia, por enviarme su amor y sus oraciones constantes. A mamá, por darme aliento al compartirme de tu alegría, paz y la confianza a través de la luz y la fe que se reflejan en tu mirada.

A mis hermanas: Chefy, Camochita, Gualu, Betty, Nena y Flor, por quererme, bendecirme y animarme durante todo el proceso. En especial a Nena y Flor, por haberme apoyado constante e incansablemente; pero sobre todo por el gran cariño y los cuidados que les brindaron a mis hijos, al hacerlos también sus hijos; estaré eternamente agradecida por ello.

Agradecimientos Personales

Agradezco a Dios por este crecimiento académico, que se convirtió en una gran experiencia de vida. Por mostrarme día a día, a través de sus maravillosas manifestaciones de amor, que las cosas de la vida no tienen límites, ni en tiempo, ni espacio, cuando se trata de llevar a cabo tareas o acciones que confluyen en un crecimiento personal, en todas nuestras dimensiones.

A mi comité tutelar: Dr. Pedro Medellín Milán, Dr. José Antonio Avalos Lozano y Dr. Alfredo Ávila Galarza. Muchas gracias por su apoyo durante este proceso, por compartir su experiencia, y por sus valiosas recomendaciones.

Laurita, Maru, Ara, Lore, Fara. Muchas gracias por su amistad; por su disposición y gran apoyo en las cuestiones administrativas del posgrado.

A Mirna, por el apoyo y el ánimo que siempre me brindaste durante esta experiencia, y siempre, a través de nuestra bella y valiosa amistad.

A las personas que conocí en mi trayecto durante mis estudios y que, de alguna forma, las tengo presentes. Por orden de “llegada”:

Berenice y Frank, por abrirme las puertas de su casa al pisar tierras Potosinas, y sobre todo, por su amistad.

Adrián, por tu solidaridad y disposición siempre constantes; sobre todo, por tu apoyo al llegar a SLP, gracias amigo.

Angeles, por tu valiosa presencia; por estar siempre dispuesta a compartir nuestras mutuas experiencias en el posgrado y en nuestra vida personal, haciendo con ello que el camino fuera más ligero, alegre, y de mayor crecimiento.

Lupis, por “siempre estar” y compartir nuestro crecimiento personal, a pesar de la distancia; y por ese radar certero para hacerte presente en los momentos buenos, pero aún más, en los no tan buenos.

Franco, por tus consejos, que desde tu perspectiva me hacían ver las cosas en forma distinta. Gracias por esas tardes-noches de tertulia en las que lográbamos dejar la tesis (por momentos).

Noé, por tu disposición y apertura para escuchar las experiencias académicas. Por tu apoyo y tus valiosos consejos, gracias amigo.

Geo y Nuria, gracias por haber compartido esas situaciones similares que vivimos, que finalmente fueron un aprendizaje mutuo y valioso.

Lupita Urizar, por tus asesorías académicas, pero sobre todo por tu amistad, y por enseñarme que hay momentos en nuestra vida en los que debemos poner en la balanza nuestros planes y metas de vida.

Clem, por haberme compartido tus conocimientos con gusto y paciencia; pero sobre todo, por hacerme creer y sentir que siempre puedo aprender y dar más, en todas mis dimensiones.

Ana Lucia, por esa gran amistad, por tu disposición a escuchar y a compartir nuestras vivencias; y por tus conclusiones “contundentes” y certeras al final de cada charla.

Mago, por tu apacible compañía y por incluirme en tus oraciones, por preocuparte por mí y por seguir estando, aun de lejos. Valoro tus consejos y tu amistad, y esas palabras “remediales” que tienes.

Blankis, por tu forma alegre de ver la vida. Gracias por hacerme parte de tus vivencias, por tus palabras de ánimo; y por el aprendizaje compartido.

Angélica, por compartirme parte de tu proceso académico, y por haberme permitido aprender de esa bella relación personal que tienes; gracias amiga.

Contenido

Resumen.....	13
Abstract.....	14
Capítulo 1. Contexto general.....	15
1.1. Antecedentes.....	15
1.2. Objetivos.....	24
1.2.1. Objetivo general.....	24
1.2.2. Objetivos específicos.....	25
1.3. Justificación.....	25
1.4. Área de estudio.....	27
Dinámica industrial de San Luis Potosí.....	29
Capítulo 2. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector procesos industriales.....	32
2.1. Introducción.....	32
2.2. Marco teórico.....	37
2.2.1. La atmósfera y el efecto invernadero.....	37
2.2.2. Los gases de efecto invernadero y sus fuentes.....	39
2.2.3. Inventarios de emisiones a la atmósfera.....	39
2.3. Metodología.....	56

2.3.1. Planeación de categorías de fuentes.....	58
2.3.2. Determinación de datos de actividad y factores de emisión.....	58
2.3.3. Cálculo de las emisiones.....	63
2.3.4. Calculo de la incertidumbre.....	66
2.4.1. Emisiones en la producción de cemento: subcategoría 2A1.....	67
2.4.2. Emisiones en la producción de cal: subcategoría 2A2.....	74
2.4.3. Emisiones por el uso de piedra caliza y dolomita: subcategoría 2A3.....	79
2.4.4. Emisiones por la producción de asfalto: subcategoría 2A6.....	82
2.4.5. Emisiones en la fabricación de productos de vidrio: subcategoría 2A7.....	85
2.4.6. Emisiones en los procesos químicos: subcategoría 2B5.....	89
2.4.7. Emisiones en la producción de hierro y acero: subcategoría 2C1.....	93
2.4.8. Emisiones en la producción de pulpa y papel: subcategoría 2D1.....	101
2.4.9. Emisiones en la producción de alimentos y bebidas: subcategoría 2D2.....	102
2.5 Conclusiones.....	106
2.6 Referencias.....	114
Capítulo 3. El enfoque bottom-up y el control de calidad: imprescindibles en el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector procesos industriales.....	121

Resumen.....	121
Abstract.....	122
3.1. Introducción.....	123
3.2 Metodología.....	125
3.3. Resultados.....	128
3.3.1. Caso de la subcategoría 2C1: producción de hierro y acero.....	128
3.3.2. Caso de la subcategoría 2A1: Producción de Cemento.....	132
3.4. Conclusiones y Recomendaciones.....	138
3.5. Referencias.....	142
Capítulo 4. Factores determinantes de las emisiones de CO ₂ asociadas al uso de combustibles en el sector industrial de San Luis Potosí.....	145
Resumen.....	145
Abstract.....	146
4.1 Introducción.....	146
4.2 Metodología.....	149
4.3 Resultados.....	151
4.4. Discusión.....	154
4.5 Conclusiones.....	156
4.6.Referencias.....	156

Capítulo 5. Escenarios de las emisiones de CO ₂ generadas por el uso de combustible en el sector industrial de San Luis Potosí.....	165
Resumen.....	165
5.1 Introducción.....	165
5.2 Antecedentes.....	167
Los factores determinantes de las emisiones de CO ₂	168
Los escenarios futuros de las emisiones de CO ₂	171
5.3 Metodología.....	178
5.4 Resultados.....	184
5.4.1 Aplicación del método LMDI para identificar la contribución por subsector en el efecto de los factores determinantes sobre la variación de las emisiones de CO ₂ del sector manufacturero de acuerdo a la identidad de Kaya.....	184
5.4.2 Escenarios de las emisiones proyectadas al 2020 a partir de intervalos de confianza de la media de los índices de variación de los factores determinantes.....	188
5.4.3 Escenarios de Reducción.....	198
5.5 Discusión.....	203
5.6 Conclusiones.....	206
5.7. Referencias.....	207
Capitulo 6. Estrategias de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.....	217

Resumen.....	217
6.1 Introducción.....	217
6.2 Antecedentes.....	219
6.3 Metodología.....	227
6.3.1 Estrategias de mitigación de emisiones de CO ₂ en la producción de cemento.....	228
6.3.2 Estrategias de mitigación de emisiones de CO ₂ en la producción de acero.....	234
6.3.3 Estrategias de mitigación de emisiones de CO ₂ en la producción de azúcar.....	240
6.4 Resultados.....	244
6.5 Conclusiones.....	252
6.6 Referencias.....	254
Conclusiones generales.....	258
Recomendaciones generales.....	262
Anexos.....	265

Resumen

En las últimas décadas, la evidencia de la influencia humana en el cambio climático se ha vuelto más clara y convincente. La concentración de dióxido de carbono, el gas de efecto invernadero (GEI) más contribuyente, se ha incrementado en un 40% desde la era preindustrial debido, en primer lugar, a las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles; y en segundo, por el cambio de uso del suelo, que disminuye la capacidad fotosintética del planeta. Es por esto que, conocer las emisiones de GEI, así como sus factores determinantes y el futuro de las mismas, constituye un proyecto imprescindible y primordial que antecede a cualquier estrategia de reducción de sus emisiones al aire. En este contexto, en la presente investigación se realizó el inventario de las emisiones de GEI del sector industrial en el estado de San Luis Potosí, se analizaron los factores determinantes de dichas emisiones para construir escenarios al 2020; y finalmente se plantearon las posibles estrategias de reducción. Las directrices del IPCC fueron la base metodológica del inventario, bajo algunas modificaciones; para el análisis de los factores determinantes se aplicó la metodología LMDI; y un análisis cualitativo fue el marco para las propuestas de reducción de emisiones de GEI del sector de estudio. Los resultados indicaron que, durante el periodo 2000-2006, las emisiones totales de CO₂e generadas por el sector industrial manufacturero fueron 39 985 775 toneladas; las subcategorías más contribuyentes fueron la de producción de cemento con un 39%, hierro y acero con el 26%, la industria alimentaria con un 19%. Además, en el análisis de la variación interanual de las emisiones de CO₂ del modelo de Kaya, se encontró que los efectos de la intensidad energética y del PIB son los más importantes. De acuerdo a los escenarios proyectados al 2020, las emisiones, bajo una dinámica tendencial en el sector manufacturero, podrían alcanzar 6 498 220 tCO₂. Dentro de la gama de los escenarios se detectaron potenciales de mitigación, para lo cual se propusieron estrategias en los subsectores que más contribuyeron tanto en las emisiones absolutas como en la variación de las mismas.

Abstract

In recent decades, evidence of human influence on climate change has become more clear and convincing. The concentration of carbon dioxide (CO₂), the greenhouse gas (GHG) that contributes more has increased 40% since pre-industrial times due primarily to emissions from burning fossil fuels; and secondly, by the change of land use, which reduces the photosynthetic capacity of the planet. That is why, knowing GHG emissions and their determinants and the future thereof, is an essential and fundamental project that precedes any strategy to reduce air emissions. In this context, the present investigation the inventory of GHG emissions from the industrial sector in the state of San Luis Potosi was performed, the determinants of the emissions were analyzed to construct scenarios to 2020; and finally possible reduction strategies were proposed. The IPCC Guidelines were the methodological basis of the inventory, under some modifications; to analyze the determinants LMDI methodology was applied; and a qualitative analysis was proposed framework for reducing GHG emissions in the study area. The results indicated that, during 2000-2006, the total CO₂e emissions from manufacturing industry were 39,985,775 tons; subcategories that contributed more emissions were cement production 39%, iron and steel with 26%, food industry 19%, and the production of lime with 6%. Furthermore, the analysis of the variation in CO₂ emissions Kaya model, it was found that the effects of energy intensity and GDP are the most important. According to the 2020 projected scenarios, emissions, under a dynamic trend in manufacturing, could reach 6,498,220 tCO₂. Within the range of potential mitigation scenarios were detected, for which strategies were proposed in the subsectors that contributed both in absolute emissions and the variation thereof.

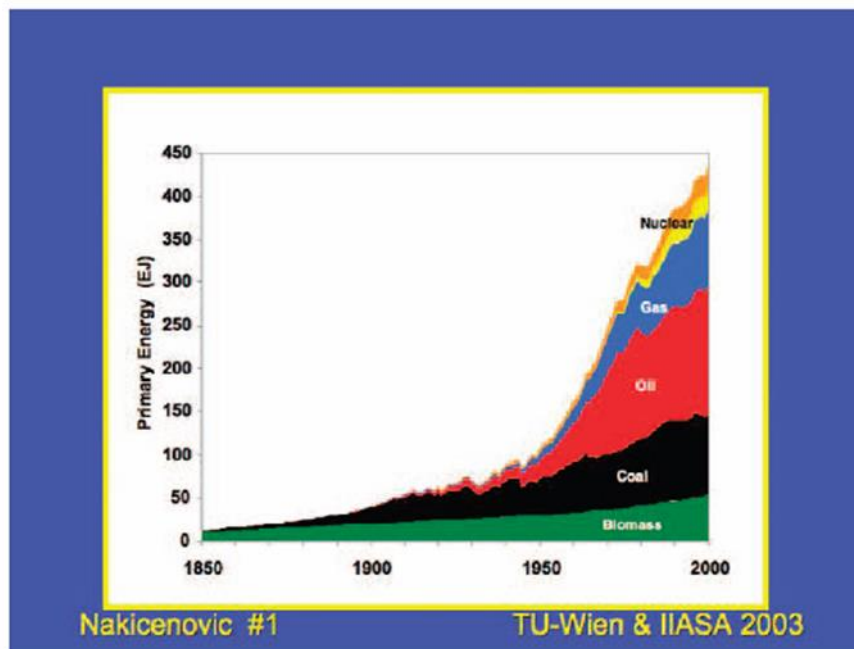
Capítulo 1. Contexto General

1.1. Antecedentes

En los últimos dos siglos el crecimiento exponencial industrial y comercial generó un incremento, sin precedente, del consumo global de todo tipo de productos y modificó casi completamente la superficie continental del planeta (Barros, 2005). Entre los años 1800 y 2000 la población creció más de seis veces, la economía mundial alrededor de 50 veces y el uso de la energía cerca de 40 veces. Sin duda alguna, la era industrial es reconocida por un marcado crecimiento económico catapultado por el uso casi indiscriminado de recursos naturales, con el incremento en el uso de combustibles fósiles como un factor determinante en este proceso (Gráfica 1.1). Del año 1950 al 2000, el porcentaje de la población mundial que vive en áreas urbanas creció de 30% al 50% y continúa creciendo como efecto de la industrialización (Steffen et al., 2007).

La base de la expansión del consumo fue el ritmo explosivo del desarrollo tecnológico, y la producción industrial-comercial que hizo que por primera vez el género humano produjera impactos globales sobre el planeta. Estos impactos se han hecho latentes en diversas partes, a lo largo y ancho del planeta, por lo que es imprescindible y pertinente analizarlos desde una perspectiva global y bajo un enfoque sistémico.

Cada vez son más evidentes las alteraciones que se manifiestan en diferentes partes del mundo, y además dichos cambios incluyen variaciones en distintas estructuras del sistema Océano-Tierra-Atmósfera. En los últimos 50 años, los humanos han cambiado los ecosistemas mundiales más rápida y extensivamente que en cualquier otro periodo comparable en la historia de la humanidad (Steffen et al., 2007).



Gráfica 1.1. Uso de combustibles primarios en el periodo de 1850 a 2000 (TU-Wien y IIASA, 2003).

Numerosos estudios, con grados de confianza aceptables, muestran evidencias fehacientes de los cambios que desde hace algunos años se han presentado a nivel global en el sistema Océano-Tierra-Atmósfera. Para entender y explicar estas modificaciones se han hecho diversos esfuerzos conformando equipos multidisciplinarios de científicos, como el Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), que después de hacer el escrutinio sobre numerosos estudios científicos acerca de los cambios observados en el sistema climático, en su quinto informe de evaluación (AR5, por sus siglas en inglés) mostró evidencia y concluyó de manera contundente acerca del calentamiento del sistema climático (IPCC, 2013: 4):

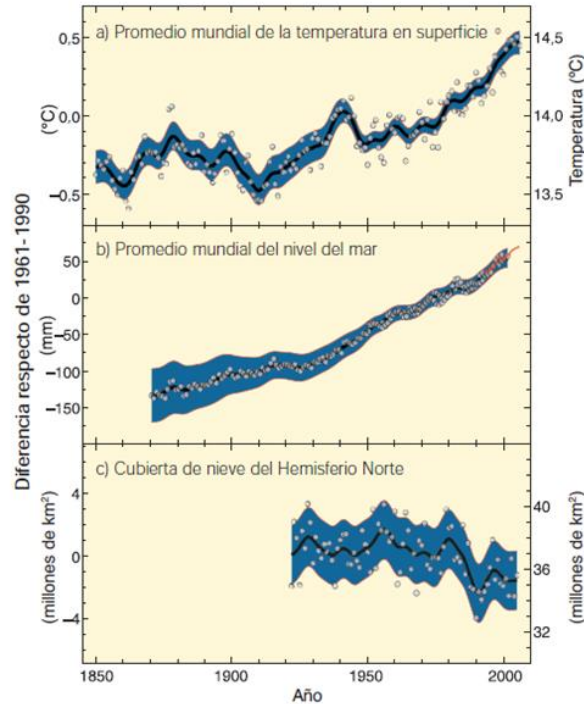
“El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado,

los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado”.

En los diversos reportes generados por el IPCC se ha mostrado evidencia, cada vez con mayor certidumbre, acerca de los cambios observados en algunos indicadores físicos, probando con ello la realidad del cambio climático. El panel presentó los cambios en las diferencias en el promedio mundial de la temperatura y nivel del mar, así como en la cubierta de nieve en el Hemisferio Norte durante el periodo 1850-2000, tomando como base el periodo de 1961-1990 (Gráfica 1.2) (IPCC, 2007).

Los impulsores del cambio climático obedecen tanto a procesos naturales como antropogénicos, que alteran el balance energético de la Tierra (Nelson et al., 2006). Los cambios en los flujos de energía provocados por los cambios experimentados en dichos impulsores se cuantifican a través del forzamiento radiativo (RF, por sus siglas en inglés); es decir, su influencia o impacto en el balance de la radiación terrestre, y en caso de que dicho RF sea positivo, inducirá a un calentamiento en la superficie de la Tierra; en caso contrario, provocará un enfriamiento (Lenton y Vaughan, 2009).

Actualmente, el RF total es positivo, generando que el sistema climático absorba la energía acumulada; y las actividades antropogénicas han contribuido en gran medida con este forzamiento al generar cambios en la composición atmosférica, tanto en forma directa por emisión de gases o partículas o de forma indirecta sobre la química atmosférica. La mayor contribución en este RF positivo se debe al incremento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero directos, que en forma conjunta y bien mezclados proporcionan un forzamiento de $2,83 \text{ W/m}^2$, y el dióxido de carbono es el mayor contribuyente de estos, al proporcionar un forzamiento de $1,69 \text{ W/m}^2$ (IPCC, 2013).

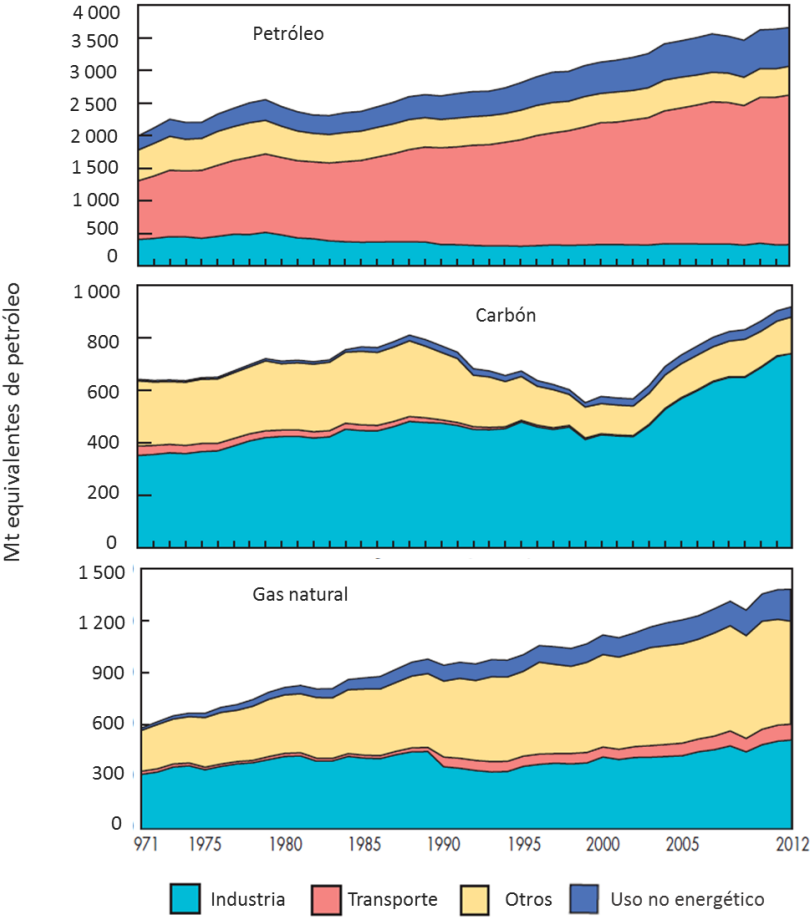


Gráfica 1.2. Variación observada de: a) el promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar; c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante marzo-abril. Las curvas alisadas representan los valores promediados decenalmente, mientras que los círculos denotan los valores anuales (IPCC, 2007).

Las concentraciones atmosféricas de CO₂ se han incrementado desde 1750 debido, principalmente, a las actividades humanas que queman combustibles fósiles, y por los cambios en el uso del suelo que desplazan o destruyen elementos fotosintéticos (Tans, 2009). Comparando las concentraciones de estos gases entre 1750 y 2011, las concentraciones de CO₂ pasaron de 278 ± 2 ppm a 390,5 ppm (Etheridge et al. 1996); las de CH₄ cambiaron de 722 ± 25 ppb a 1803 ± 2 ppb (Dlugokencky et al., 2011); y el N₂O cambió de 270 ± 7 ppb a 324,2 ppb (Prather et al., 2012).

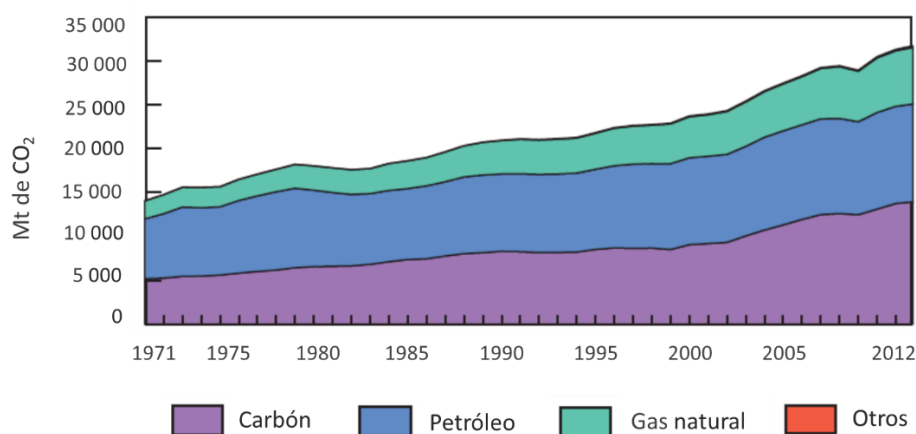
El declive del uso de la biomasa a partir de 1850, marcó el inicio del uso de los combustibles fósiles a nivel global. A partir de ese momento, el carbón fue el principal suministro energético, y su demanda dominó el mercado durante casi un siglo. A partir de 1920, el uso del petróleo inició un marcado crecimiento, sustituyendo en gran parte al carbón; también el gas natural ha contribuido, en

mucho menor grado, en la sucesión (Nakicenovic, Grubler y Mc Donald, 1998). Aunque estos combustibles han reflejado una ligera disminución en su contribución como suministro de energía primaria en las últimas décadas, siguen predominando a nivel mundial con una participación del 81,7% durante el 2012, al generar 10 924 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo) de un total de 13 371 Mtep. Por otra parte, cada uno de estos combustibles fósiles han cubierto las necesidades energéticas en diferentes ámbitos; por ejemplo, desde 1970, el petróleo ha sido la principal fuente de energía para el sector transporte, mientras que el carbón y el gas natural han cubierto, principalmente, las necesidades del sector industrial (Gráfica 1.3) (IEA, 2013).



Gráfica 1.3. Consumo global de combustibles fósiles por sector, en millones de toneladas equivalentes de petróleo (IEA, 2014).

La importante contribución de los combustibles fósiles como fuente de energía en las diferentes actividades humanas, así como su dinámica temporal, se ha reflejado también en las emisiones de CO₂. Entre 1971 y 2012, las emisiones mundiales generadas por la quema de estos energéticos se han duplicado, al pasar de 15 633 Mt de CO₂ a 31 734 Mt (Gráfica 1.4). Cabe destacar que, aunque el petróleo ha sido el mayor contribuyente, el gas natural y el carbón han manifestado un incremento importante en su participación; donde se observa el terreno que el uso de carbón ha ganado en las emisiones, al producir 5 472 Mt en 1971 y 13 931 Mt durante el 2012, ganando con esto nueve puntos porcentuales en su contribución, al cambiar del 35% al 43,9% (IEA, 2014).



Gráfica 1.4. Emisiones mundiales de CO₂ generadas por la quema de combustibles fósiles (IEA, 2014).

El uso de combustibles fósiles también genera emisiones de otros contaminantes conocidos como GEI indirectos o gases de vida corta, como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el dióxido de azufre (SO₂); que tienen un efecto invernadero indirecto mediante la alteración, a través de las reacciones químicas en la atmósfera, en las concentraciones de otros GEI importantes como el ozono troposférico (O₃), y el CH₄ (Monks et al., 1998; Galán y Fernández, 2006). La concentración de los GEI indirectos obedece a condiciones de escala local o regional debido a su corto tiempo

de vida, por lo que no hay una medida global de su concentración, tal como la que existe para los GEI directos, que son de larga vida.

El incremento en la concentración de los GEI, así como su repercusión en el incremento de la temperatura media global cobró la atención y preocupación generalizada como consecuencia de las inquietantes y controvertidas declaraciones que desde 1990 hiciera el IPCC en su Primer Informe de Evaluación (FAR, por sus siglas en inglés) respecto a la problemática del cambio climático. Como consecuencia de esto, en la Conferencia de Río '92, en la cual se congregaron jefes de estado y delegados de 170 países, se creó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo último fue:

“La estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel deberá lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible” (Artículo 2, CMNUCC, 1992).

Con base en el principio de “responsabilidades comunes pero diferenciadas” se congregó a los países signatarios de la CMNUCC en distintos grupos. Los países desarrollados fueron integrados en el Anexo I de la Convención, que incorpora a todos los miembros de la OCDE y los de economías en transición; los países en desarrollo quedaron en el grupo “No-Anexo I”; y los países miembros de la OCDE quedaron agrupados como Anexo II (Alba, 2004).

Los países miembros de la CMNUCC adquirieron diferentes compromisos, dependiendo del grupo al que pertenecieran; sin embargo, todos convinieron en realizar inventarios nacionales de las emisiones de gases de efecto invernadero,

como un inicio de futuros esfuerzos para la mitigación y estabilización de los GEI y reportar los resultados en las Comunicaciones Nacionales. Este compromiso quedó establecido en los artículos 4 y 12 de la CMNUC: como actividad de las Comunicaciones Nacionales, cada parte de esta Convención se compromete a informar a la Conferencia de las Partes (COP, por sus siglas en inglés), que es la máxima autoridad de la CMNUCC, sobre sus emisiones por fuente y sus absorciones por sumideros de todos los gases de efecto invernadero que no estén controlados por el Protocolo de Montreal (inventarios de GEI).

Con el objetivo de establecer compromisos vinculantes para la reducción de las emisiones de GEI, en el 2005 entró en vigor el Protocolo de Kioto, que es un acuerdo internacional en el que se establecen objetivos de reducción, legalmente vinculantes, para los países del Anexo-I. Se estableció una meta general de reducir las emisiones de GEI en al menos un 5% para el año 2012, con respecto a los niveles de emisiones de 1990 (CMNUCC, 1998); sin embargo, los alcances de este acuerdo fueron muy limitados debido, en gran parte, a que Estados Unidos, principal generador de GEI, no ratificó el Protocolo. Por lo anterior, en 2012, durante la COP 17, que se efectuó en Durban, las Partes acordaron el inicio de un proceso para elaborar un protocolo, otro instrumento jurídico o una conclusión acordada con fuerza legal en el marco de la Convención que sea aplicable a todas las Partes, cuyas negociaciones comenzarán en 2015, para que el pacto quede listo antes de 2020 (CMNUCC, 2012).

En la COP 17 se enfatizó la necesidad de llevar a cabo fuertes reducciones en las emisiones mundiales de GEI, lo cual se sustentó en la información presentada en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC. En este reporte se indica que se requiere no sobrepasar una concentración de 450 ppm de CO₂ en la atmósfera para que el aumento de la temperatura media mundial con respecto a los niveles preindustriales se mantenga por debajo de 2°C; por lo tanto, las Partes deberán adoptar medidas urgentes para alcanzar este objetivo a largo plazo. Además, desde la COP 15,

efectuado en Copenhague en el 2009, se sugirió que las Partes que son países en desarrollo y las economías emergentes realicen planteamientos sobre sus Acciones Nacionales Adecuadas de Mitigación (NAMAS, por sus siglas en inglés).

Como miembro perteneciente al grupo No-Anexo I de la CMNUCC, México ha reportado ante esta Convención sus emisiones en cinco ocasiones, actualizando así su inventario nacional de emisiones de GEI. Esta labor ha sido llevada a cabo por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), con la última actualización que comprende el periodo 1990-2010 (INE-SEMARNAT, 2012).

En el 2005, el gobierno federal creó, de manera oficial, la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), con el objeto de coordinar y promover el desarrollo de programas y estrategias de acción climática relativos al cumplimiento de los compromisos adquiridos por México ante la CMNUCC (DOF, 2005). Esta Comisión presentó la primera Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC 2007-2012) el 25 de mayo de 2007, de donde se derivó el Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 (PECC). Entre los planteamientos principales de la ENACC 2007-2012, destaca la descripción de las condiciones de vulnerabilidad de México; y en materia de mitigación, presenta un énfasis especial en el desarrollo de los estudios e investigaciones prioritarias para enfrentar el problema.

El PECC 2009-2012 contiene objetivos y metas vinculantes en mitigación y adaptación al cambio climático para el periodo 2008-2012, que representan oportunidades para impulsar el desarrollo sustentable, la seguridad energética, y procesos productivos limpios y eficientes (PECC, 2009). El Programa incluye un capítulo de largo plazo en el que se plantean opciones con perspectivas para reducir emisiones rumbo al 2020 y 2050; sin embargo, no incluye metas oficiales a un mediano plazo entre 2012-2020.

Como parte de la voluntad política por llevar a cabo acciones que contribuyan a la mitigación y adaptación al cambio climático, el gobierno de México expidió en junio

de 2012 la Ley General de Cambio Climático (LGCC). En esta ley se propone una meta aspiracional para reducir al año 2020 un 30% de las emisiones con respecto a la línea de base; así como un 50% de reducción en las generadas en el 2050 en relación con las emitidas en el año 2000, bajo ciertas restricciones de apoyo financiero internacional (DOF, 2012).

Aunado a lo anterior, en varias entidades federativas se están llevando a cabo los planes estatales de acción ante el cambio climático (PEACC), que comprenden, entre otras acciones, la elaboración de inventarios estatales de emisiones de gases de efecto invernadero, análisis de variabilidad climática, y estrategias de mitigación (INE, 2011). Atendiendo a esta voluntad y al firme convencimiento de que el cambio climático se debe enfrentar con la colaboración coordinada y comprometida, el estado de San Luis Potosí se ha unido a este propósito.

Derivado de lo anterior, la presente investigación presenta las estrategias posibles de reducción de las emisiones de GEI en el sector industrial manufacturero de San Luis Potosí, basadas en la realización del inventario estatal de los GEI liberados en dicho sector, en el análisis de los factores determinantes de tales emisiones; y en los escenarios de las mismas, proyectados al 2020. El inventario, realizado con un enfoque bottom-up, integra las emisiones generadas por el uso de combustibles en las industrias, así como las liberadas en el proceso productivo per se.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Elaborar una estrategia de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero para el sector industrial manufacturero, basada en un inventario de emisiones del estado de San Luis Potosí, que utilice datos de actividad desagregados, suficientemente precisos para que generen datos de emisión con un grado de certidumbre aceptable para los propósitos enunciados.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Elaborar un inventario de las emisiones atmosféricas del sector industrial, para el periodo 2000-2006, que incluya las emisiones de gases de efecto invernadero directos: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HCF), perfluorocarbonos (PFC) y hexafloruro de azufre (SF₆); los gases de efecto invernadero indirectos: óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuesto orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM), así como el dióxido de azufre (SO₂).
- 2) Generar datos de emisión con un grado de certidumbre aceptable, a partir de la aplicación del enfoque bottom-up y de las técnicas de control de calidad.
- 3) Identificar los factores determinantes de la variación de las emisiones CO₂ generadas por el uso de combustible en el sector manufacturero, a través del análisis de los factores de la identidad de Kaya.
- 4) Determinar el efecto de los subsectores industriales sobre los factores determinantes de las emisiones de GEI, mediante la aplicación de la metodología de índices Divisia de media logarítmica (LMDI).
- 5) Identificar y proponer estrategias de reducción de emisiones, a partir de la construcción de escenarios de emisiones proyectadas al 2020, que correspondan con la dinámica específica del sector industrial manufacturero de San Luis Potosí.

1.3 Justificación

La justificación del presente estudio procede, de forma global, del objetivo de la CMNUCC, enunciado en su artículo 2 (Naciones Unidas, 1992):

El objetivo último de la presente Convención y de todo instrumento jurídico conexo que adopte la Conferencia de las Partes, es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

Si bien es cierto que la contribución de México al total mundial de las emisiones de GEI es sólo del 1,6% (CICC, 2007), y que como país No-Anexo I de la CMNUCC, aún no está obligado a mitigar sus emisiones, el interés por medirlas y comunicarlas, así como por establecer estrategias de mitigación estriba, entre otras cosas, en la posibilidad de solicitar ante instancias internacionales el apoyo económico justo para atender los efectos adversos que el cambio climático podría generar en el país, para lo cual se considera necesaria la comprobación de ser un emisor menor, pero con efectos “mayores” del cambio climático.

En el contexto nacional, la Ley General de Cambio Climático (DOF, 2012) tiene por objeto:

Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero” (p. 1).

El cumplimiento de la LGCC requiere que las entidades federativas calculen sus emisiones y elaboren escenarios de mitigación y adaptación. Para establecer metas de reducciones coherentes y pertinentes es necesario conocer, de la manera más

precisa posible, las emisiones de GEI que se generan en el país; y una manera de incrementar esa precisión es hacer tales mediciones a escalas estatales o municipales.

Considerando lo anterior, un inventario de las emisiones de los GEI directos e indirectos generadas por el sector industrial de San Luis Potosí, construido bajo un enfoque bottom-up, que incluya el cálculo de su incertidumbre, así como un análisis de los factores determinantes de la variación de las emisiones y su futuro, servirá como una herramienta útil para:

1. Analizar y validar los datos del inventario nacional de emisiones de GEI.
2. Construir y proponer estrategias de mitigación de GEI más acertadas, precisas y alcanzables, generadas a partir de la identificación de las categorías principales de fuentes.
3. Proporcionar información de utilidad para la evaluación y planificación del desarrollo económico estatal.
4. Identificar los sectores económicos estatales o de carácter federal a los que se encuentran asociadas las mayores emisiones de GEI.
5. Proponer metas de reducción de emisiones con un co-beneficio, debido a que la mayoría de los GEI indirectos son considerados también como contaminantes criterio que afectan la calidad del aire.

1.4 Área de estudio

La cobertura geográfica del estudio corresponde al estado de San Luis Potosí, el cual cuenta con 58 municipios, distribuidos en una extensión territorial de 60 983 km², que ocupan el 3,1% de la superficie total de la República Mexicana (INEGI, 2011).

La resolución espacial del estudio se centra en cada una de las unidades económicas del sector manufacturero del estado, específicamente, aquellas denominadas como fuentes fijas o estacionarias de emisión que, según el artículo seis del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, es toda aquella instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios y que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera (SEMARNAT-INE, 2005).

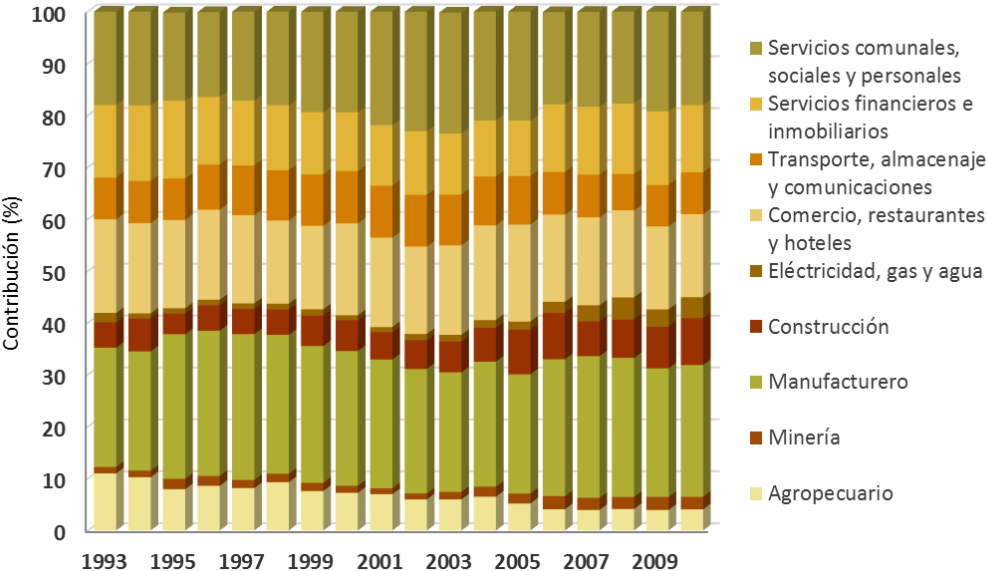
Para efectos del presente estudio, las fuentes puntuales de emisión principales se centran entre la mediana y la gran empresa del sector manufacturero. De acuerdo al censo económico estatal del 2009, el número de unidades económicas establecidas en el estado son 8 113, de las que el 91,4% corresponden a la micro empresa (1 a 10 empleos), el 5,5% a la pequeña empresa (11 a 50 empleos), el 1,9% a la mediana empresa (51 a 250 empleos) y el 1,2% corresponden a la grande empresa (más de 250 empleos) (SDE, 2010).

Dinámica industrial de San Luis Potosí

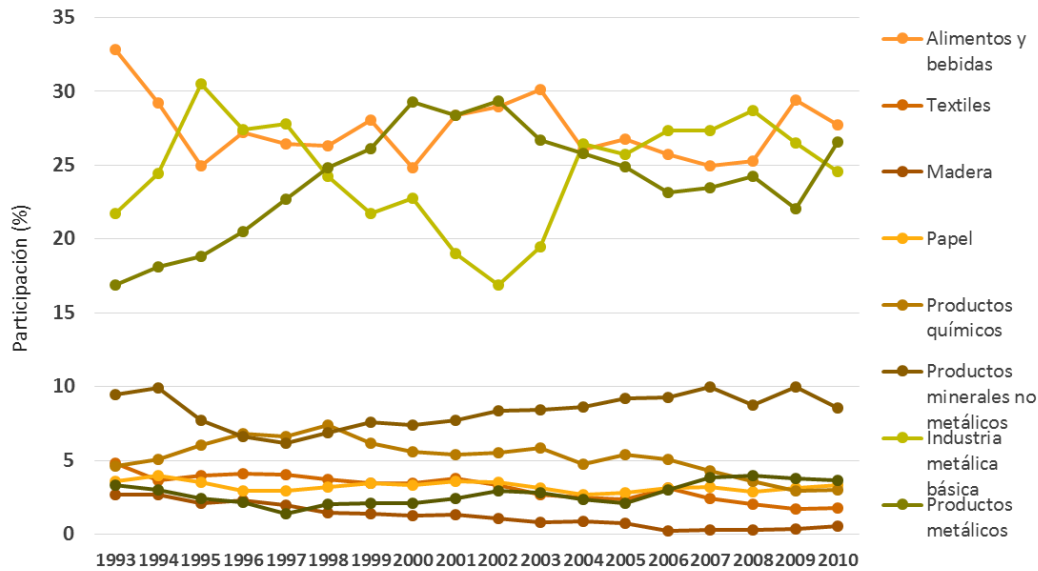
La movilidad de la población, de las zonas rurales hacia las urbanas, es una manifestación clara de la concentración de las fuentes de empleo, sea como medio de subsistencia o para mejorar la calidad de vida de las personas. San Luis Potosí no queda exento de esta situación, la distribución de su población (urbana o rural) ha manifestado grandes cambios, de forma tal que en 1980 el 53% de su población se concentraba en las zonas rurales, y veinticinco años después solo el 37% permanecía en dichas regiones (INEGI, 2012). Tales cambios en la distribución de la población del estado se deben, en gran medida, a la creciente oferta de trabajo que el sector de la industria manufacturero ha proporcionado en las zonas urbanas, principalmente, en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

En los últimos veinte años, el sector industrial manufacturero ha sido el contribuyente principal del Producto Interno Bruto (PIB) estatal, al conservar una participación que, generalmente, ha estado por encima del 24% anual; seguido por el sector de servicios comunales, sociales y personales, cuya contribución ha sido de entre el 18% y el 23%; y en tercer lugar, el sector de comercio, restaurantes y hotelería con el 17,15% en promedio (Gráfica 1.5).

Durante el periodo 1993-2010 han sido tres los subsectores que de manera importante han contribuido en el sector manufacturero de San Luis Potosí; a saber, el subsector de alimentos y bebidas, con un 27,4% en promedio, seguido por la industria metálica básica con un 24,56%; el tercer lugar le corresponde al subsector de productos metálicos (fabricación de maquinaria y equipo), con una contribución del 24,0% (Gráfica 1.6).



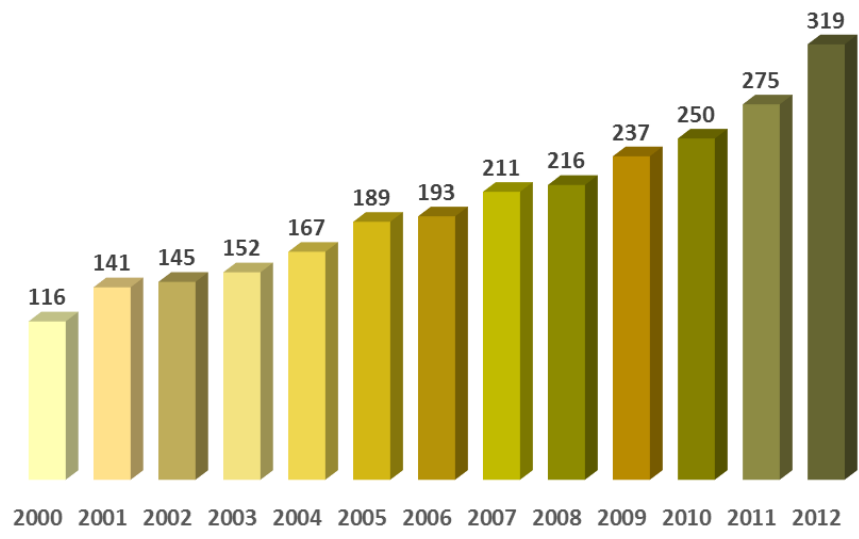
Gráfica 1.5. Contribución de los sectores económicos de San Luis Potosí en el PIB estatal. Elaboración propia con datos de INEGI (2001, 2005, 2009, 2012).



Gráfica 1.6. Dinámica de la contribución de los subsectores industriales en el PIB manufacturero de San Luis Potosí. Elaboración propia con datos de INEGI (2001, 2005, 2009, 2012).

Las tendencias que expresan los diferentes subsectores manufactureros obedecen, en gran parte, a la situación económica que el país ha experimentado a través del tiempo; pero además, a las particularidades que el estado de San Luis Potosí tiene en cuanto a la especialización que, en algunos de estos subsectores, se le ha reconocido a nivel nacional.

El crecimiento de la industria manufacturera en San Luis Potosí ha mantenido una tendencia positiva en los últimos años, impulsada por la inversión extranjera (Gráfica 1.7), que se ha concentrado de manera importante en las empresas del subsector de fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo. La apertura de estas empresas puede ser un factor de marcada contribución en las emisiones de GEI y contaminantes al aire, debido a que corresponden al grupo de medianas y grandes empresas, que son las que, en su mayoría, requieren de una mayor cantidad de energía para sus procesos.



Gráfica 1.7. Dinámica de la cantidad de empresas con inversión extranjera directa en San Luis Potosí (SEDECO, 2006, 2014).

Capítulo 2. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector procesos industriales

2.1. Introducción

Como parte de la preocupación del deterioro ambiental global y con la finalidad de entender las implicaciones del cambio climático, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon en 1988 el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, con el objetivo de realizar evaluaciones periódicas de los conocimientos en el tema; así como elaborar informes especiales y documentos técnicos sobre temas en los que la información y el asesoramiento científicos e independientes son necesarios (IPCC, 2011).

El incremento en la concentración de los GEI, así como el papel de estos gases como impulsores importantes en el incremento de la temperatura media global, cobró la atención y preocupación generalizada como consecuencia de las inquietantes y controvertidas declaraciones que desde 1990 realizó el IPCC en su Primer Informe de Evaluación (FAR, por sus siglas en inglés) respecto al problema del cambio climático.

En atención a la preocupación del cambio climático, los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), adquirieron en la cumbre de Río diferentes compromisos, dependiendo del grupo al que pertenecían; sin embargo, todos convinieron en realizar inventarios nacionales de las emisiones de GEI, como un inicio a futuros esfuerzos para la mitigación y estabilización de los mismos. Para cumplir con el compromiso anterior, el grupo especial de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero del IPCC elaboró guías metodológicas para estimar las emisiones de GEI.

La mayoría de los países que forman parte de la Convención cuentan con un primer Inventario Nacional de Emisiones de GEI; sin embargo, los datos son para diferentes periodos por lo que no son completamente comparables. Por otra parte, las emisiones de CO₂ por el uso de combustible han sido una medida de referencia para efectos de confrontación; por esto, los datos que la Agencia Internacional de Energía (EIA, por sus siglas en inglés) ha publicado anualmente han servido para tal efecto.

De acuerdo con el informe publicado por la Agencia en el 2011, durante el periodo 1971-2010, la emisión mundial de CO₂ derivada del consumo de combustibles fósiles aumentó alrededor de 115%; y en el 2010, cinco países fueron responsables del 58%: Estados Unidos, China, Rusia, Japón e India, que en conjunto emitieron 16 935,9 millones de toneladas de un total de poco más de 30,2 mil millones de toneladas. Aunque México contribuye solo con el 1.4% de estas emisiones, se ubica entre los primeros quince países de mayor volumen (EIA, 2011).

En el contexto nacional, la experiencia de México en la elaboración de inventarios de emisiones al aire, en general, data de 1988, cuando se implementó el Sistema Nacional del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas, así como un estudio que se llevó a cabo para cuantificar las emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). A mediados del decenio de 1990 se elaboraron los inventarios de las principales zonas metropolitanas del país: ZMVM, Guadalajara (ZMG), Monterrey (ZMM) y Valle de Toluca (ZMVT), y de algunas ciudades como Mexicali, Ciudad Juárez y Tijuana. Estos inventarios se elaboraron, en gran medida, con propósitos encaminados a la gestión de la calidad del aire; incluyeron las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno NO_x, plomo (Pb), y partículas (SEMARNAT, 2005).

El primer inventario nacional de México (INEM) integró las emisiones generadas por todas las categorías de fuente durante 1999, pero se publicó en el 2006. Incluye la

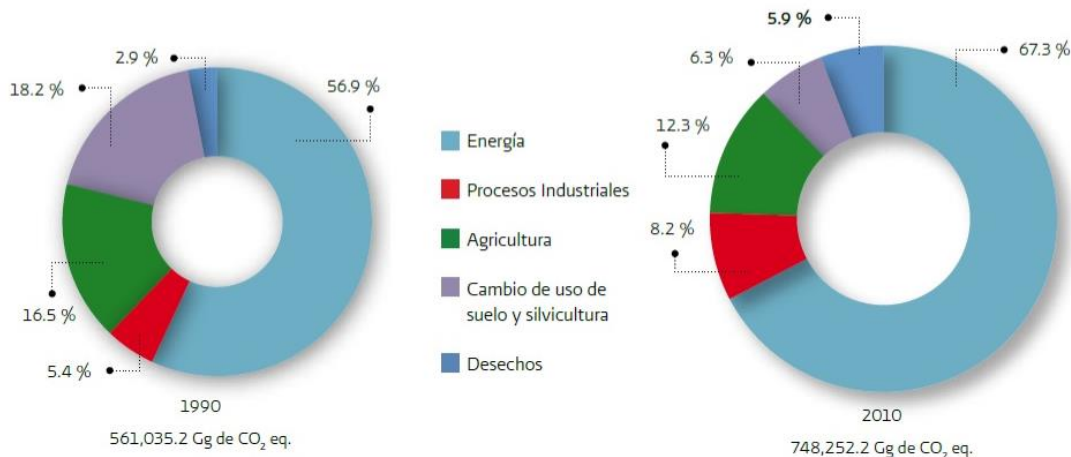
información desagregada por cada entidad federativa y por municipio, en relación a las emisiones de CO, SO_x, NO_x, compuestos orgánicos volátiles (COV), PM₁₀, PM_{2.5}, y amoníaco (NH₃). A nivel nacional se emitieron 1 424 628 Mg (mega gramos) de NO_x, 2 856 516 Mg de SO_x, 2 599 654 Mg de COV, 7 493 909 Mg de CO, 794 349 de PM₁₀, 574 387 Mg de PM_{2.5}, y 1 305 442 de NH₃; de los cuales San Luis Potosí participó con el 0,21%, 2,99%, 2,21%, 2,41%, 3,23%, 3,19%, y 2,63% respectivamente (INE-SEMARNAT, 2006).

En el año 2011 se publicó el más reciente INEM con datos de 2005, el cual presenta la estimación de las emisiones de contaminantes por fuente, por estado y municipio. A nivel nacional, Considerando sólo a las fuentes antropogénicas, los contaminantes emitidos fueron 41.9 Mg de CO, 5.2 Mg de COV, 3.1 Mg de SO₂ y 2.8 Mg de NO_x (INE-SEMARNAT, 2011).

En cuanto a la experiencia en la elaboración de inventarios de emisiones de GEI, la primera estimación nacional se realizó en 1995, con cifras de 1990. Los resultados se presentaron ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1997 como parte de la Primera Comunicación Nacional de México ante la Convención. Posteriormente se calcularon las emisiones de 1994, 1996 y 1998 con la metodología revisada del IPCC de 1996. Cabe señalar que debido al cambio de método, las comparaciones del inventario de 1990 con los demás años no son correctas, mientras que las comparaciones entre los valores de los años 1994, 1996 y 1998 son válidas (SEMARNAT, 2005).

México ha reportado ante la CMNUCC sus emisiones en cinco ocasiones, actualizando constantemente su Inventario Nacional de Emisiones de GEI. El inventario nacional, actualizado al 2010, incluyó cinco sectores y alcanzó 748 252,2 Gigagramos de CO₂ equivalentes (Gg de CO₂eq); correspondiendo al sector de energía la mayor contribución en las emisiones nacionales, seguido por agricultura y procesos industriales (Gráfica 2.1). Es importante señalar el incremento que los

sectores de procesos industriales y desechos han experimentado en sus respectivas contribuciones entre 1990 y 2010 (SEMARNAT-INE, 2012).



Gráfica 2.1. Contribución de los sectores en las emisiones nacionales de CO₂eq en 1990 y 2010 (SEMARNAT-INE, 2012).

En el contexto estatal, San Luis Potosí cuenta con un inventario estatal que incluye a todas las fuentes de emisión; se deriva del INEM que realizó el INE en colaboración con la EPA en 1999. Este inventario se actualizó con datos del 2005, arrojando que, durante ese año, en San Luis Potosí se emitieron 89 748 Mg de SO₂, 766 906 Mg de CO, 131 687 Mg de NO_x, 342 812 Mg de COV, 29 342 de PM₁₀, 21 903 Mg de PM_{2.5}, y 27 356 Mg de NH₃. (INE-SEMARNAT, 2011).

En el ámbito exclusivo de las fuentes fijas, la Facultad de Ingeniería de la UASLP desarrolló en 1996 un inventario sobre las emisiones al aire generadas por las empresas instaladas en el parque industrial de la ciudad de San Luis Potosí; en el cual se utilizaron factores de emisión a partir del consumo de combustibles de las organizaciones y de los datos de actividad, y una estimación por balance molar (Aldrett, 2000). Los resultados de este trabajo se presentaron en el "Foro Internacional sobre Estudios de Caso en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales" (Ávila et al., 2000).

En el mismo contexto estatal, Olivo (2013) elaboró un inventario de las emisiones de GEI generadas por el sector de energía. Se realizó bajo la metodología propuesta por el IPCC, que consiste en la técnica de factores de emisión. Los resultados arrojaron que las emisiones totales de CO_{2e} del sector de estudio, durante el periodo 2000-2006 fueron 79 352 Gg (Gigagramos); de las cuales el 39,60% correspondieron a la generación de electricidad, el 29% al sector industrial por el uso de combustibles, el 21,30% por las fuentes móviles, y el 9,30% al sector doméstico.

Por otra parte, aunado a los esfuerzos que a nivel nacional se han llevado a cabo para elaborar los inventarios de emisiones de GEI como una herramienta para proponer acciones futuras de mitigación frente a la problemática del cambio climático, varias entidades federativas están llevando a cabo los Planes Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). Estos planes incluyen, entre otras acciones, la elaboración de inventarios estatales de emisiones de gases de efecto invernadero, análisis de variabilidad climática, y estrategias de mitigación de GEI (INE, 2011).

Atendiendo a lo anterior y con el firme convencimiento de que el cambio climático se debe enfrentar a través de una colaboración coordinada y comprometida, el estado de San Luis Potosí se unió al propósito de llevar a cabo el PEACC estatal (este trabajo). Dentro de los proyectos de este plan, el inventario de emisiones de GEI es parte medular para proponer posibles estrategias de reducción de estas emisiones.

En este segundo capítulo del estudio se expone el método que se aplicó para cumplir con el primer objetivo específico de estimar las emisiones de GEI directos e indirectos del sector industrial de San Luis Potosí. La metodología es la propuesta en las guías del IPCC, con algunas modificaciones; y en cada una de las categorías de las fuentes de emisión se describe el flujo del proceso productivo, así como el

punto específico del proceso en el que se generan las emisiones, y los resultados de cada uno de los distintos GEI generados.

2.2. Marco teórico

2.2.1. La atmósfera y el efecto invernadero

La atmósfera está constituida principalmente de nitrógeno N_2 (78.1%), oxígeno O_2 (20.9%) y argón Ar (0.93%). Aunque cerca del 99% de esta composición está dada por el N_2 y O_2 , estos no tienen importancia en los fenómenos meteorológicos, debido a su interacción limitada con las entradas de radiación solar y la interacción nula con la radiación infrarroja emitida por la Tierra. Sin embargo, también hay un número de gases traza tales como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3), que aunque sólo constituyen menos del 0.1% del volumen de la atmósfera, tienen la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja, contribuyendo con esto de manera importante en el balance de radiación de la atmósfera (WGI-IPCC, 2001; Sendiña, 2006). El vapor de agua es otro constituyente importante en la atmósfera, cuya concentración es muy variable (0-4% por volumen) y que comparte las mismas características de los gases traza antes mencionados (Schlatter, 2009); por ello son conocidos como gases de efecto invernadero.

En promedio, cerca del 31% de la radiación de onda corta que entra a la parte superior de la atmósfera se refleja hacia el espacio debido a la reflexión de las nubes (albedo, 16%), de las partículas del aire (7%) y de la superficie de la Tierra (8%). Otro 20% de la radiación de onda corta entrante es absorbida por la atmósfera, especialmente por el ozono en la atmósfera superior (estratósfera), y por las nubes y el vapor de agua en la atmósfera baja (tropósfera). El restante 49% alcanza la superficie de la Tierra como radiación directa o difusa, y es absorbida (WGI-IPCC, 2007; Chapin III et al., 2002).

La Tierra emite la energía absorbida; aproximadamente el 21% es transferida de la superficie de la Tierra a la atmósfera por la evaporación del agua (flujo de calor latente) o por la transferencia de calor de la superficie caliente hacia la atmósfera adyacente más baja (flujo de calor sensible). El otro 79% la emite como radiación de onda larga, debido a su relativamente baja temperatura en la superficie. Gran parte de esa radiación es atrapada por los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera baja, los cuales a su vez la reemiten a la superficie de la Tierra, contribuyendo con esto a su calentamiento. A este fenómeno se le llama efecto invernadero (Health Encyclopedia, 2004 y Chapin III et al., 2002); y gracias a la retención de calor a través de estos gases, la temperatura promedio de la superficie es de 15° C, en lugar de -18° C (Tremblay et al., 2005).

Los cambios experimentados en las concentraciones de los GEI, los aerosoles, la cubierta terrestre y la radiación solar entrante alteran el balance de energía del sistema climático y son factores que impactan en el cambio climático; comprendiendo este último, según la CMNUCC (1992), como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. Los factores antes mencionados afectan el balance radiativo entre la radiación de onda corta entrante y la radiación de onda larga saliente, por ello se les reconoce como impulsores del cambio climático (WGI-IPCC, 2002).

Los cambios positivos o negativos del balance de energía se expresan en términos de forzamiento radiativo (FR), que es la variación de la irradiación neta (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa, debida a una modificación del causante externo del cambio climático; por ejemplo, una variación de la concentración de dióxido de carbono o de la radiación solar (Figura 2.1).

2.2.2. Los gases de efecto invernadero y sus fuentes

Los gases de efecto invernadero constituyen parte de la atmósfera y tienen la propiedad de ser prácticamente transparentes a la radiación que proviene del Sol, pero absorben la radiación infrarroja que proviene de la superficie de la tierra, y contribuyen con esto al calentamiento del planeta (SEMARNAT, 2003). Estos gases son emitidos tanto de forma natural, provenientes de ecosistemas acuáticos (lagos, estuarios, humedales) o ecosistemas terrestres (bosques y suelos), así como por actividades humanas (Tremblay et al., 2005).

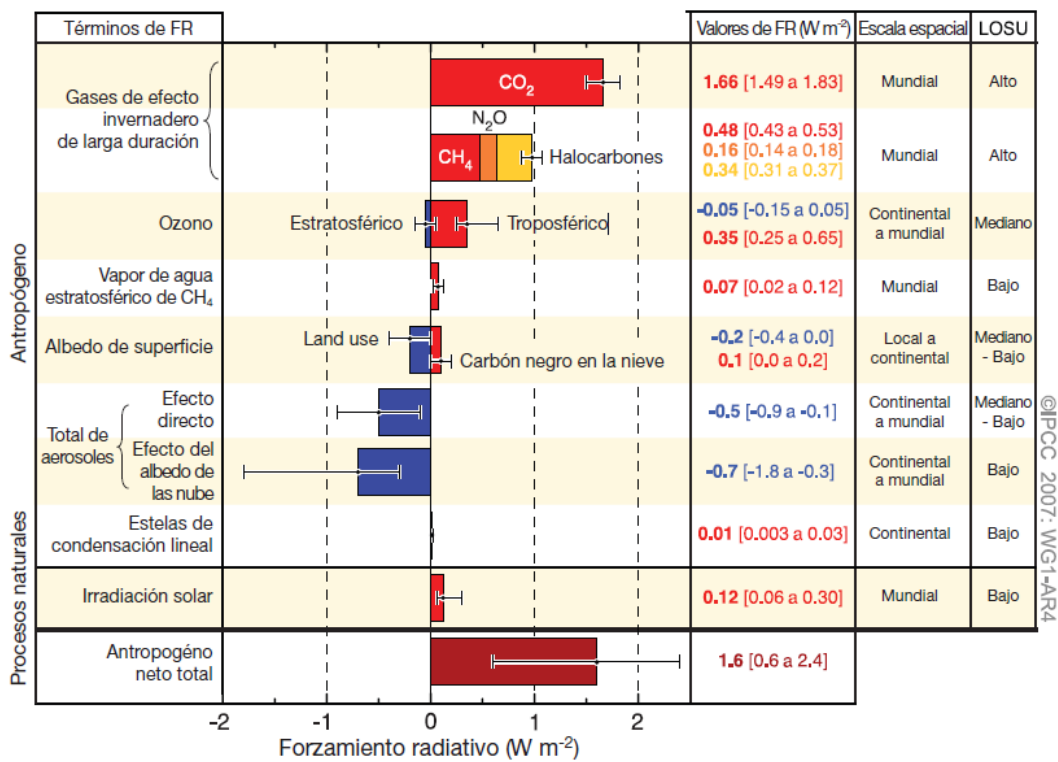


Figura 2.1. Estimaciones y margen de variación del forzamiento radiativo (FR) medio mundial en 2005 para el CO₂, CH₄, N₂O y otros agentes importantes, conjuntamente con la extensión geográfica típica del forzamiento y del nivel de conocimiento evaluado (IPCC, 2007).

El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante, seguido por el CO₂. El CH₄, el N₂O, el O₃ y algunos otros gases presentes en la atmósfera en pequeñas cantidades también contribuyen al efecto invernadero (WGI-IPCC, 2007).

Se ha demostrado que la concentración de los GEI en la atmósfera es casi constante alrededor del planeta y dentro de los 80 km de altura por encima de la superficie, y que el tiempo medio de residencia de estos gases en la atmósfera es desde años hasta varias décadas. Contrastando con esto, el vapor de agua sólo permanece alrededor de diez días, debido a que su concentración en la atmósfera es muy cambiante, pues depende de las variaciones regionales en la evaporación de la superficie, la precipitación y el transporte horizontal del vapor de agua (Chapin III et al., 2002). Por ello, este GEI no ha sido considerado en las plataformas de los acuerdos internacionales, puesto que las actividades antropogénicas no afectan directamente sus emisiones.

A pesar de que existen varios GEI en la atmósfera, los que se han incluido dentro de las negociaciones internacionales son aquéllos que se ha demostrado que son importantes impulsores del calentamiento global debido a su forzamiento radiativo, así como por su potencial de calentamiento; y que además, son emitidos directamente tanto por fuentes naturales como por las actividades humanas, llamados por esto último como GEI directos. De acuerdo a las características antes mencionadas, los principales GEI directos son el CO₂, CH₄, y N₂O.

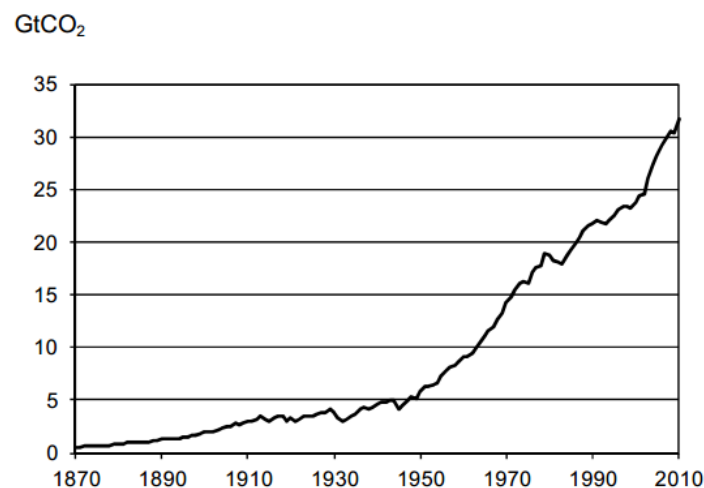
Entre los GEI directos, también se incluyen a los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre, que son poderosos GEI sintéticos emitidos en pequeñas cantidades por diferentes procesos industriales, y se utilizan como sustitutos de las sustancias agotadoras de la capa de ozono.

La CMNUCC promueve la estimación nacional de los gases precursores en la formación de GEI, conocidos como GEI indirectos. Estos son compuestos que no son en sí mismos gases de efecto invernadero ni aerosoles, pero que influyen en las concentraciones de GEI y de los aerosoles al contribuir en los procesos físicos o químicos que rigen sus tasas de producción o destrucción. Los más importantes

son los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos distintos del metano (COVDM), y el dióxido de azufre (S₂O).

Dióxido de carbono (CO₂).

La fuente principal de emisiones de CO₂ a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles tales como el petróleo, gas natural y carbón. Además de las generadas por la combustión de residuos sólidos, productos de árboles y madera. También se emite como resultado de reacciones químicas durante la producción de minerales, cemento y de cal; así como en procesos especializados de producción de metales (US-EPA, 2001). El aumento del uso de combustibles fósiles ha sido asociado al crecimiento económico de las naciones, razón por la cual las emisiones de CO₂ han manifestado la misma tendencia (Gráfica 2.2) (SEMARNAT, 2003).

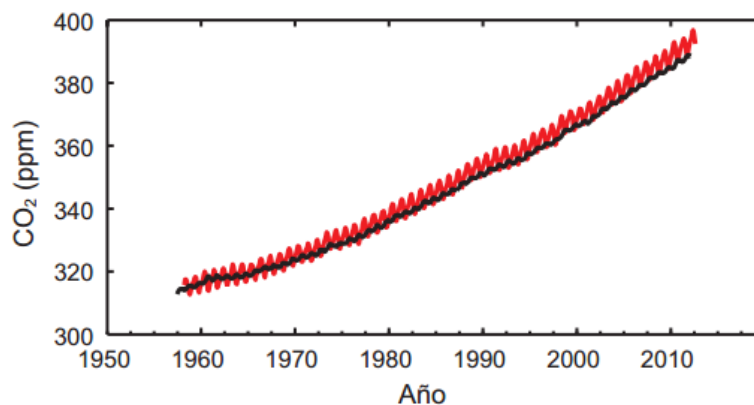


Gráfica 2.2. Emisiones mundiales de CO₂ producidas por la quema de combustibles fósiles, 1755-2001 (EIA, 2013).

De acuerdo a la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, por sus siglas en inglés) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, por sus sigla en inglés), las emisiones de CO₂ contribuyen en un 80-85% del total de las

emisiones de GEI. En un panorama global, la quema de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía eléctrica son las fuentes de emisión principales, y contribuyen con un 50% de estas emisiones (Tremblay et al., 2005).

El CO₂ es removido de la atmósfera (secuestrado) al ser absorbido por las plantas, como parte del ciclo biológico del carbón o es diluido a través de los procesos geofísicos; sin embargo, estos procesos naturales de remoción han sido rebasados debido al incremento de la concentración de este gas en la atmósfera, que ha pasado de 316,0 ppm en 1959 a 369,4 ppm en el 2000, y en el 2011 alcanzaron 390,5 ppm (Gráfica 2.3) (Marland y Boden, 2001; US-EPA, 2002; IPCC, 2007; IPCC, 2013).



Gráfica 2.3. Concentraciones atmosféricas de CO₂ en Mauna Loa (19°32 N, 155°34 W, en rojo) y en el Polo Sur (89°59 S, 24°48 W, en negro) (IPCC, 2007).

Metano (CH₄).

El metano es emitido tanto por fuentes naturales, como por fuentes relacionadas con actividades humanas. Dentro de estas últimas se encuentran:

Rellenos sanitarios.

El metano es generado en rellenos sanitarios o tiraderos abiertos por la descomposición de los residuos municipales bajo condiciones anaerobias (US-EPA,

2002). La cantidad de estas emisiones depende, en gran medida del número de habitantes en las ciudades. Por ejemplo, en la zona metropolitana del valle de México, los rellenos sanitarios son la fuente principal de emisiones de metano, con una contribución de 223 346 toneladas anuales; esto es el 95% de las emisiones totales de metano (SMA-D.F., 2004).

Fermentación entérica.

El metano es un producto final de la fermentación que sufren los alimentos en el rumen, que en términos de energía constituye una pérdida y en términos ambientales contribuye al cambio climático global (Bonilla y Lemus, 2012). El ganado domesticado, como vacas, borregos, cabras, entre otros, producen cantidades significativas de metano, como parte de su proceso normal digestivo.

Tratamiento de aguas residuales.

Las aguas residuales de fuentes municipales e industriales son tratadas para remover materia orgánica soluble, sólidos suspendidos, organismos patógenos y contaminantes químicos. Estos tratamientos producen emisiones de metano cuando se realizan en condiciones anaerobias, y contribuyen con el 5% de las emisiones globales de este gas (Parra, Apaza y Agramont, 2010).

Además de las fuentes de emisión de metano, explicadas anteriormente, existen otras, como las derivadas de procesos agrícolas como el cultivo de arroz inundado en agua, la producción y distribución de gas natural y petróleo; así como de las actividades del minado del carbón (Cuatecontzi, 2002).

La concentración de CH₄ en la atmósfera mundial ha aumentado, respecto de un valor preindustrial de aproximadamente 715 ppb, hasta 1 732 ppb a comienzos de los años 90s, y en el 2011 llegaron a 1 803 ppb. Las tasas de crecimiento han disminuido desde el comienzo de los años 90, en concordancia con las emisiones

totales (suma de fuentes antropogénicas y naturales), que fueron casi constantes durante ese período (Gráfica 2.4) (IPCC, 2007).

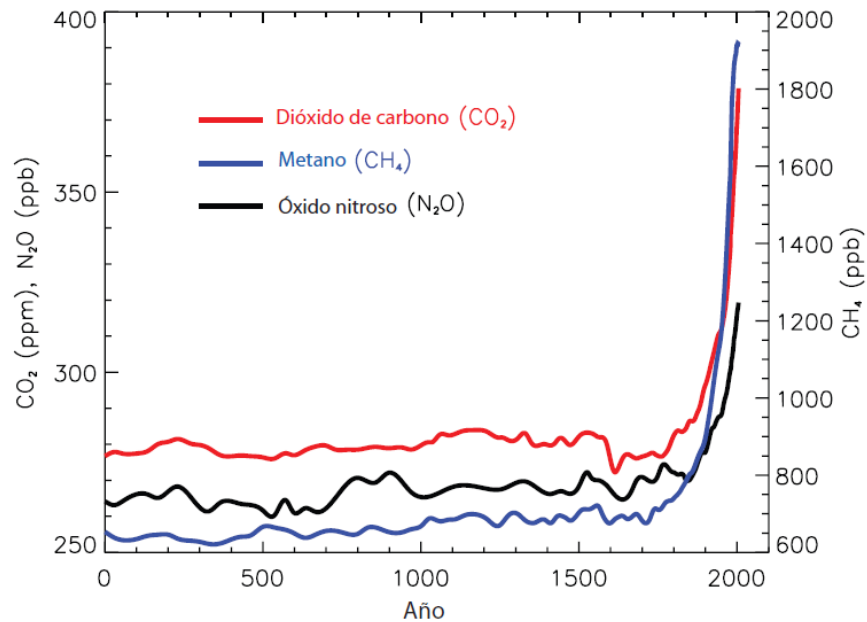
Óxido nitroso (N₂O).

El N₂O es emitido a la atmósfera durante las actividades agrícolas, a través del uso de fertilizantes sintéticos y abonos; así como por la quema de biomasa, en este mismo sector; de hecho, se cree que el incremento de las emisiones de N₂O se debe a la creciente disponibilidad de nitrógeno en el suelo, por el uso excesivo de fertilizantes (TAR-IPCC, 2001). Las fuentes industriales de N₂O incluyen las producciones de nylon y ácido adípico y nítrico, el tratamiento anaerobio de aguas residuales, la quema de combustibles fósiles en plantas de energía; otras emisiones importantes provienen de fuentes vehiculares (Cuatecontzi, 2002).

La concentración de N₂O troposférico se ha ido incrementando, de los valores preindustriales (1750) en alrededor de 270 ppb, pasando a un valor medio global de 314 ppb en 1998, hasta alcanzar concentraciones de 324,2 ppb en el 2011 (IPCC, 2013).

Hidrofluorocarbonos (HFCs).

Los HFCs con las mediciones atmosféricas más altas, en orden decreciente son HFC-23, HFC-134^a y HFC-152a. El HCF-23 es un subproducto de la producción del HCF-22, tiene un tiempo de vida atmosférico de 260 años y su concentración se ha incrementado, entre 1978 y 1995, de 3 a 10 ppmb. El HCF-134a es usado principalmente como refrigerante, sobre todo para el aire acondicionado de los autos y tiene un tiempo de vida atmosférico de 13,8 años, con una tasa de crecimiento exponencial. El HFC-152a tiene un corto tiempo de vida atmosférico de 1,4 años, y sus concentraciones son por debajo de 1ppb (WGI-IPCC, 2007).



Gráfica 2.4. Concentraciones de gases de efecto invernadero de larga vida en los últimos 2000 años (del año 0 al 2005). (IPCC, 2007).

Perfluorocarbonos (PFCs).

El perfluorometano (PF_4) tiene un tiempo de permanencia atmosférico de 50 000 años. Otros como el perfluoroetileno (C_2F_6) también tienen tiempos de vida largos, y absorben gran cantidad de radiación infrarroja; por lo tanto, aún en cantidades reducidas tienen la posibilidad de influir sobre el clima hasta un futuro muy lejano. Estos gases son emitidos durante la producción de aluminio (Cuatecontzi, 2002; US-EPA, 2011).

Hexafluoruro de azufre (SF_6).

El SF_6 es un gas de efecto invernadero 23 900 veces más eficaz que el CO_2 , en términos de su potencial de calentamiento. Se utiliza como aislante en la manufactura de interruptores y equipos eléctricos, así como en el proceso de producción de magnesio. Aunque sus concentraciones en la atmósfera son relativamente bajas, su tiempo medio de permanencia de 3 200 años, lo convierte

en uno de los gases de efecto invernadero más potenciales (Cuatecontzi, 2002 y US-EPA, 2008).

Los gases de efecto invernadero indirectos.

El uso de combustibles fósiles también genera emisiones de otros contaminantes conocidos como GEI indirectos o gases de vida corta, como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM) y el dióxido de azufre (SO₂); los cuales tienen un impacto indirecto sobre el efecto invernadero mediante la alteración, a través de las reacciones químicas en la atmósfera, en las concentraciones de otros GEI importantes como el ozono troposférico (O₃), y el CH₄ (Monks et al., 1998; Galán y Fernández, 2006). La concentración de los GEI indirectos obedece a condiciones de escala local o regional debido a su corto tiempo de vida, por lo que no hay una medida global de su concentración, tal como la que existe para los GEI directos, que son de vida larga.

Por otra parte, algunos de los GEI indirectos están catalogados como contaminantes criterio, y sus concentraciones están normadas debido a los efectos que provocan en la salud y el medio ambiente; entre ellos, el CO, el O₃ y los NO_x (IEH, 2010; Chen et al., 2011; Chen, Yang, Ma, Bi y Huang, 2013).

2.2.3. Inventarios de emisiones a la atmósfera

Un inventario de emisiones es una base de datos que enlista, por fuente, la cantidad de contaminantes descargados a la atmósfera de una comunidad en un tiempo dado (USA-EPA, 2013). En forma general, los contaminantes al aire se clasifican como partículas sólidas y líquidas, y gases orgánicos e inorgánicos. Según su concentración, algunos se consideran de gran impacto en la salud y el medio ambiente, y otros son impulsores del cambio climático.

Los inventarios son una fuente de información importante que se aplica para propósitos diversos: identificar las fuentes principales de emisión para determinar las estrategias adecuadas para reducir sus impactos; así como servir de datos de entrada en la modelación de dispersión de contaminantes (McGraw, Haas, Young y Evens, 2010). Debido a la relevancia del inventario de emisiones, existe una demanda creciente para mantenerlos cada vez más precisos y actualizados (Lin et al., 2005; Taghavi, Cautenet y Arteta, 2005).

El grado de detalle o alcance de un inventario de emisiones al aire depende del enfoque que se aplique durante su realización: el bottom-up (de abajo hacia arriba), que utiliza datos específicos del punto de emisión o el top-down (de arriba hacia abajo), que se origina en datos agregados a nivel sectorial, municipal, estatal o nacional (Davison et al., 2008; US-EPA, 2008). Aunque la elección del enfoque depende, en gran medida, de la disponibilidad de los datos, se debe tomar en cuenta que la precisión del inventario es importante para sustentar el diseño de medidas de mitigación.

Las emisiones al aire provienen de una mezcla de miles de fuentes de emisión que van desde grandes chimeneas industriales (emisiones puntuales) hasta el uso de productos domésticos industriales de limpieza (emisiones dispersas). Según el propósito del inventario, las fuentes de emisión se agrupan en cuatro categorías, a saber: fuentes puntuales o fijas, fuentes de área, fuentes móviles (vehículos automotores), y fuentes naturales (SEMARNAT-INE, 2005).

Fuentes fijas de emisión.

Según el artículo seis del Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, una fuente puntual de emisión es toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar una operación o proceso industrial comercial o de servicio o que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera (SEMARNAT-INE, 2005). Para ser

más precisos, la LGEEPA especifica 11 sectores industriales clasificados como fuentes puntuales de jurisdicción federal, a saber: químico, petróleo y petroquímico, pinturas y tintas, automotriz, celulosa y papel, metalúrgica, vidrio, generación de energía eléctrica, asbesto, cementera y calera, tratamiento de residuos peligrosos (Art. 111bis LGEEPA).

Por otra parte, de acuerdo al artículo siete de la LGEEPA, se consideran fuentes puntuales de jurisdicción estatal a todas aquellas industrias establecidas y que por exclusión no pertenecen a las de jurisdicción federal; es decir; los establecimientos cuyos giros sean: productos agrícolas y alimenticios, productos de madera y derivados, bebidas y tabaco, productos minerales no metálicos (excepto cemento, cal y yeso), textiles y curtidos de pieles, ingenios azucareros, manufactura de cerámicas y productos de barro, así como recubrimiento industrial de superficies y operaciones de pintura industrial (SEMARNAT-INECC, 2013).

Técnicas de estimación de emisiones para fuentes fijas.

Existen diferentes técnicas para llevar a cabo la estimación de las emisiones generadas en las fuentes puntuales. La elección de la técnica dependerá de los recursos financieros y la información disponible, así como del grado de confianza y precisión que se requiera en el inventario.

Muestreo en la fuente.

Esta técnica consiste en llevar a cabo mediciones directas de la concentración de contaminantes en un volumen conocido de gas y de la tasa de flujo del gas en la chimenea o el escape del proceso; se utilizan con mayor frecuencia para fuentes de emisiones de combustión. Esta técnica brinda un nivel de precisión y confiabilidad muy aceptables; pero dados el equipo y los recursos necesarios, resulta costosa (SEMARNAT-INECC, 2013).

Modelos de emisión.

Son ecuaciones desarrolladas para estimar las emisiones. Muchas estimaciones se desarrollan utilizando un factor de emisión que supone una relación lineal entre la tasa de emisión y una unidad de actividad (aunque el origen sea un sistema complejo y una enorme base de datos); esta relación permite construir un modelo matemático sencillo para hacer la estimación. Existen procesos en los que, además de la unidad de actividad, se integran otras variables más específicas de los parámetros de producción o de los procesos, derivando con ello en modelos de estimación más complejos.

Los modelos de emisión suponen un grado de exactitud mayor que la técnica de estimación basada en factores de emisión, pero se debe asegurar que la cantidad y la calidad de los datos alimentados al modelo sean suficientes y altamente confiables (SEMARNAT-INE, 2005).

Factores de emisión (FE).

Un FE es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante emitido a la atmosfera con una actividad asociada a la liberación de éste (US-EPA, 2007). Los FE pueden clasificarse en dos tipos:

- a) Los basados en procesos que se utilizan para las estimaciones de fuentes fijas y con frecuencia se utilizan con los datos de actividad recopilados en encuestas.
- b) Los basados en censos se utilizan comúnmente para estimar emisiones de fuentes de área.

Los FE basados en procesos son el promedio de mediciones de emisiones realizadas en un gran número de fuentes con diferentes tecnologías de combustión, antigüedad, tipo de combustible y tamaños, por lo cual pueden ser utilizados para representar una amplia variedad de fuentes, pero de un mismo proceso (CONAMA,

2009). Normalmente, la muestra tomada para calcular un FE consiste en fuentes de emisión representativas, según sea el proceso productivo de estudio.

Los FE se expresan como unidades de masa de contaminante emitido por unidad de actividad de proceso. Entre las unidades de actividad de proceso más comunes se encuentran los consumos de energía (combustible o energía eléctrica) o de cierta materia prima; las unidades de producción, el calendario de operación, el número de dispositivos, entre otros (Figura 2.2).

La ecuación general para la técnica de estimación de emisiones con FE es:

$$E = A \times FE \times (1 - ER/100)$$

Donde:

E = emisión (unidades de masa)

A = tasa de la actividad (unidades de masa o volumen)

FE = factor de emisión (unidades de masa del contaminante por unidad de masa del DA).

ER = eficiencia general en la reducción de emisiones de un equipo de control, expresada en porcentaje (si no existe equipo de control, entonces ER = 0) (SEMARNAT-INECC, 2013).

La base de FE para fuentes fijas y de área más reconocida y utilizada es la de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA), conocida como Recopilación de Factores de Emisión de Contaminantes del Aire AP-42 (AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors). Esta compilación contiene FE para más de 200 categorías de fuente de emisión; esto es, para más de 200 sectores industriales específicos (US-EPA, s.f.).

Balance de materiales.

La técnica de balance de masa, también conocida como balance de materiales, se utiliza para estimar las emisiones, considerando que la masa del contaminante es igual a la diferencia entre las entradas (materias primas) y las salidas (productos

finales) del proceso. Los balances de masa pueden realizarse a nivel de un equipo, de un proceso o de todo un establecimiento industrial (SEMARNAT, 2001), por lo que se requiere conocer información específica correspondiente de los materiales y productos en cada fase del proceso.

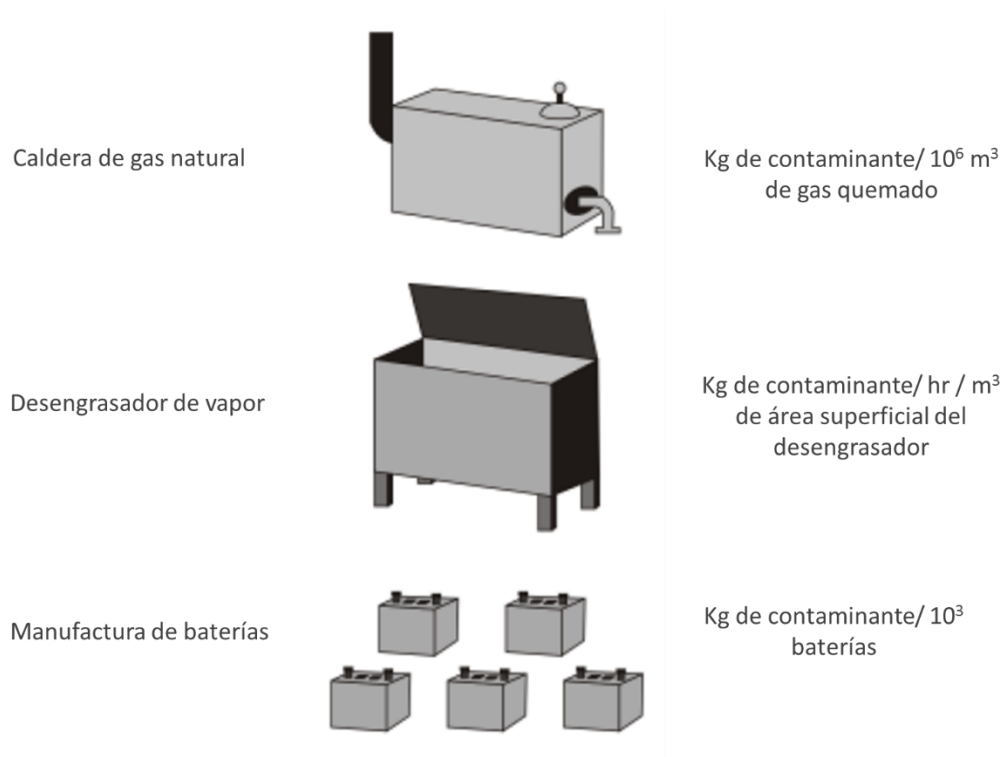


Figura 2.2. Ejemplos de FE basados en procesos (SEMARNAT-INE, 2005).

Los inventarios de gases de efecto invernadero.

Un inventario nacional de gases de efecto invernadero, en el contexto de la CMNUCC, es un listado exhaustivo, por fuentes, de las emisiones y absorciones anuales de los GEI que resultan directamente de las actividades humanas en el país que reporta (Braatz y Doorn, 2004).

Los inventarios de gases de efecto invernadero datan de los compromisos vinculantes que las naciones pertenecientes a la CMNUCC adquirieron a partir de la creación de esta convención. La importancia que estos inventarios han adquirido, a partir de entonces, se justifica en el hecho de los compromisos de carácter jurídico que se adquirieron como parte de las estrategias para enfrentar e incidir de manera conjunta sobre el fenómeno del cambio climático.

Los compromisos adquiridos por los países miembros de la CMNUCC en la cumbre de Río fueron distintos, dependiendo del grupo al que pertenecieran, pero todos convinieron en realizar inventarios nacionales de las emisiones de GEI, como un punto de partida hacia futuros esfuerzos para la mitigación y estabilización de estos gases.

Aunque existe una gran cantidad de GEI en la atmósfera, los inventarios actuales sólo incluyen aquéllos que, ya sea por su alta concentración, por su larga vida promedio o su alto potencial de calentamiento global, han sido seleccionados como los más potencialmente atribuibles al cambio climático, tal como lo indica la Decisión 17 de la COP 8 (UNFCCC, 2003):

“Cada Parte no-Anexo I, según sea el caso y en la medida de lo posible, proporcionará en su inventario nacional, estimaciones desglosadas por gases y en unidades de masa, de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) por fuentes y la absorción por sumideros. Se alienta a las partes no incluidas en el Anexo I a que, cuando proceda, faciliten información sobre las emisiones antropogénicas por fuentes de hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆)”.

Con el propósito de que cada país realice su inventario, y que sus resultados sean comparables con los obtenidos entre los miembros de la CMNUCC, el grupo especial de Inventarios Nacionales de GEI del IPCC elaboró las directrices de

orientación para estimar inventarios completos y confiables. Las guías de orientación consisten en una serie de manuales denominadas:

1. Directrices del IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero versión revisada de 1996. Conformada por tres volúmenes.

- a) El Volumen 1: Instrucciones de Reporte, incluye una introducción a los términos usados en los inventarios, así como una descripción de los distintos sectores incluidos en el inventario, a saber: energía, procesos industriales, uso de solventes, residuos, agricultura, cambio de uso de suelo y silvicultura; con sus respectivas fuentes de emisión (Figura 2.3). La guía incluye también la forma en que se deben estructurar los reportes para los resultados de la estimación de GEI de cada sector.
- b) El volumen 2: Libro de Trabajo, contiene métodos de estimación por defecto para las emisiones de cada una de las categorías de fuentes principales de CO₂, CH₄, N₂O, halocarbonos, SF₆, y para los GEI indirectos. Incluye seis módulos, que corresponden a cada uno de los sectores que integran el inventario.
- c) El volumen 3: Manual de Referencia, éste incluye una serie de metodologías o variaciones en el cálculo de la estimación de las emisiones. En general, las variaciones sugeridas en este manual contienen FE más precisos, según sea el nivel de detalle de los datos nacionales disponibles (IPCC, 1997).

2. La Guía del IPCC de las Buenas Prácticas y la Gestión de la Incertidumbre en los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (GBP).

La orientación sobre las buenas prácticas (GBP por sus siglas en inglés) brinda apoyo para la elaboración de inventarios transparentes, fundamentados, coherentes a través del tiempo, completos, comparables, con evaluación de la incertidumbre, sujetos a control y garantía de la calidad, eficientes con respecto al uso de los recursos con que cuentan los organismos encargados de los inventarios (IPCC, 2000).



Figura 2.3. Sectores incluidos en el inventario de emisiones de GEI.
Elaboración propia con datos del IPCC (2007).

3. *La Guía del IPCC de las Buenas Prácticas (GBP) para el Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (PICC 2003).*

Contiene la metodología para informar sobre las emisiones y absorciones de GEI, con un enfoque basado en las categorías del uso del suelo, para asegurar una representación total y coherente que incluya todas las zonas geográficas de un país.

Características de Calidad del inventario de GEI.

Los inventarios deben cumplir con ciertos atributos para demostrar su validez y confiabilidad:

- a) *Transparencia.* Significa que las hipótesis y metodologías utilizadas en un inventario deben aplicarse con claridad para facilitar la reproducción y evaluación

del inventario por los usuarios de la información suministrada. La transparencia de los inventarios es fundamental para la eficacia del proceso de comunicación y del examen de la información.

- b) *Coherencia*. Significa que el inventario debe ser internamente coherente en todos sus elementos con los inventarios de otros años. Un inventario es coherente si se utilizan las mismas metodologías para el año base y todos los años siguientes y si se utilizan conjuntos de datos coherentes para calcular las emisiones y absorciones de fuentes o sumideros. En determinadas circunstancias, se podrá considerar que es coherente un inventario en el que se hayan utilizado metodologías diferentes en años diferentes si los nuevos cálculos se han hecho de manera transparente, teniendo en cuenta la *Orientación sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y la Orientación sobre las buenas prácticas en el uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura* del IPCC.
- c) *Comparabilidad*. Significa que las estimaciones de las emisiones y absorciones de que informen las Partes del anexo I en sus inventarios deben poder compararse. Con este fin, las Partes en el anexo I deberán utilizar las metodologías y formularios acordados por la CP para estimar los inventarios y comunicarlos. La determinación de categorías de fuentes/sumideros deberá ceñirse al nivel de desglose que aparece en las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996, y en la *Orientación sobre las buenas prácticas en el uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura*, en los cuadros de resumen y sectoriales.
- d) *Exhaustividad*. Significa que el inventario debe abarcar todas las fuentes y sumideros y todos los gases que figuran en las Directrices del IPCC, así como otras categorías pertinentes de fuentes y sumideros que son específicas para determinadas partes del anexo I y que, por consiguiente, pueden no estar incluidas en las Directrices.

e) Exactitud. Es una medida relativa del grado en que una estimación de emisión o absorción se aproxima al valor real. Las estimaciones deben ser exactas en el sentido de que no queden sistemáticamente por encima o por debajo de las emisiones o absorciones efectivas, por lo que pueda apreciarse, y que las incertidumbres se reduzcan al mínimo posible. Deben utilizarse metodologías adecuadas, conformes a la orientación del IPCC sobre las buenas prácticas, para promover la exactitud de los inventarios (INE y Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia, 2005).

2.3. Metodología

De manera general, la metodología que se aplica en la presente investigación se divide en actividades diversas que se llevarán a cabo con el propósito de alcanzar cada uno de los objetivos específicos que se han planteado (Figura 2.4). En la parte superior del diagrama se concentran las actividades encaminadas a la elaboración del inventario de GEI, que es el primer objetivo del presente estudio, y que se describe a detalle en este capítulo. La parte inferior del esquema muestra las actividades que se llevarán a cabo para alcanzar el resto de los objetivos planteados, y que se describen a detalle en los capítulos posteriores.

El inventario, estimado bajo el enfoque bottom-up, incluirá las emisiones de GEI del sector de procesos industriales (IEEGEI-PI); además, se incluirá una estimación a nivel sectorial de las emisiones por el uso de solventes. La cobertura geográfica del IEEGEI-PI será el estado de San Luis Potosí, con una resolución espacial a nivel planta y una resolución temporal anual; para el periodo 2000-2006.

La metodología se basa en las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto Invernadero versión revisada de 1996. Sin embargo, a diferencia de lo que marcan las directrices, en el presente inventario se integrarán además,

las emisiones por el uso de combustible como fuente de energía en los procesos industriales, por lo que resulta importante definir lo siguiente:

1. Emisiones de GEI en los procesos industriales (PI): son las emisiones de GEI generadas durante los procesos físicos y químicos no relacionados a la energía, en actividades de producción conducentes a la transformación de materias primas.

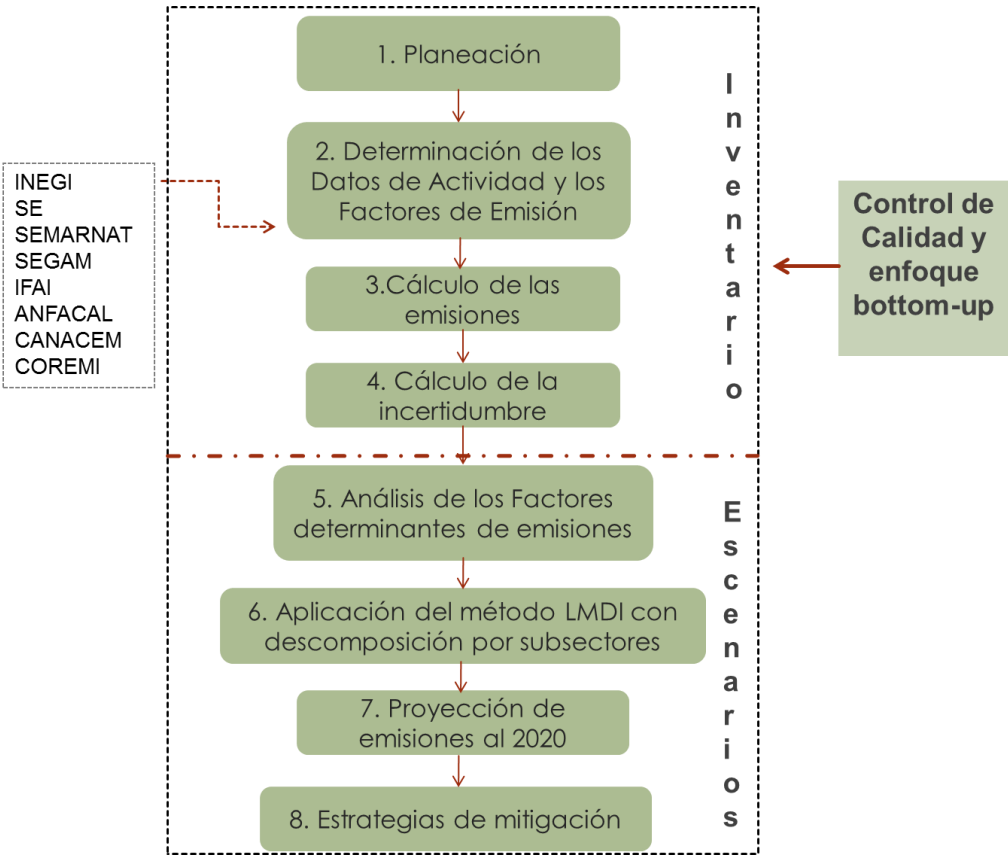


Figura 2.4. Esquema metodológico para el presente estudio.

2. Emisiones de GEI por el uso de combustible en los procesos industriales (UCPI): son las emisiones de GEI generadas por el uso de combustibles en los equipos utilizados durante los procesos industriales (hornos, calderas, quemadores, entre otros). Cabe mencionar que para este grupo, las emisiones de GEI serán estimadas como CO_{2e} (dióxido de carbono equivalente), para

unificar las unidades de emisión de los diferentes GEI y comparar las emisiones entre diferentes sectores. Para hacer las equivalencias a CO₂e, se toma en cuenta el potencial de calentamiento de cada uno de estos gases. Para el CO₂, se asigna como poder de calentamiento a la unidad; y considerando un horizonte de vida de 100 años, para el CH₄ es 21 y 310 para el N₂O (IPCC, 2008).

Los gases que se incluirán en el IEEGEI-IP corresponden a las emisiones de gases de efecto invernadero directo: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HCF), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆); así como los gases de efecto invernadero indirecto: óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuesto orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM), así como dióxido de azufre (SO₂).

2.3.1. Planeación de categorías de fuentes

En términos generales, las categorías de fuentes de emisión que integran el sector de Procesos Industriales corresponde a las llamadas fuentes puntuales o fijas de emisión, que incluye principalmente a las medianas y grandes industrias, exceptuando las plantas de generación de energía eléctrica. Las categorías y subcategorías incluidas en el sector de procesos industriales, conforme a las guías utilizadas, incorporan a los giros industriales en los que, dada la naturaleza de las materias primas utilizadas y sus procesos, es conocido que se generan emisiones de GEI. Para efectos de dar seguimiento a lo indicado en las guías, se respetará la codificación asignada a cada categoría y subcategoría (Figura 2.5).

2.3.2. Determinación de datos de actividad y factores de emisión

Este paso implica la evaluación de la disponibilidad y calidad de los datos de actividad, factores de conversión y factores de la emisión, y es necesario realizarlo antes de que se pueda elegir un método apropiado. Es primordial corroborar la confiabilidad de los datos de actividad generados por estas fuentes de información, ya que la certeza de estos influirá en la incertidumbre del inventario.

<p>2A Productos minerales</p> <ul style="list-style-type: none"> 2A1 Producción de cemento 2A2 Producción de óxido e hidróxido de calcio 2A3 Uso de piedra caliza y dolomita 2A4 Producción y uso de carbonato de sodio 2A5 Impermeabilizantes asfaltados 2A6 Pavimentación con asfalto 2A7 Vidrio <p>2B Industria química</p> <ul style="list-style-type: none"> 2B1 Producción de amonio 2B2 Producción de ácido nítrico 2B3 Producción de ácido adípico 2B4 Producción de carburos 2B5 Otros <p>2C Producción de metales</p> <ul style="list-style-type: none"> 2C1 Producción de hierro y acero 2C2 Producción de ferroaleaciones 2C3 Producción de aluminio 2C4 Uso de SF6 en fundidoras de Aluminio y Magnesio <p>2D Otros procesos industriales</p> <ul style="list-style-type: none"> 2D1 Pulpa y papel 2D2 Alimentos y bebidas 	<p>2E Producción de halocarbonos y hexafluoruro de azufre</p> <ul style="list-style-type: none"> 2E1 Emisiones como residuos o subproductos. 2E2 Emisiones fugitivas. <p>2F Consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre</p> <ul style="list-style-type: none"> 2F1 Equipos de refrigeración y aire acondicionado 2F2 Espumas 2F3 Extinguidores 2F4 Aerosoles 2F5 Solventes 2F6 Equipos eléctricos e interruptores automáticos. <p>Uso de Solventes</p>
---	--

Figura 2.5. Categorías y subcategorías del sector procesos industriales.

Datos de actividad (DA).

Para llevar a cabo los cálculos necesarios para el IEEGEI-PI, según la metodología utilizada, se requiere conocer la magnitud de las actividades para cada una de las categorías integradas en el inventario. Dichas magnitudes pueden consistir en: cantidades de materias primas utilizadas, cantidades producidas de los artículos correspondientes a cada empresa, tipo y cantidad de combustibles utilizados, entre otras. Para conocer estos datos se utilizarán diferentes recursos y fuentes de información (Figura 2.6), a saber:

Directorio nacional de unidades económicas (DENUE). Este directorio es una base de datos electrónica que contiene una lista de todas las unidades económicas ubicadas en el estado de San Luis Potosí. Para cada unidad, contiene datos sobre la razón social, giro industrial o comercial, ubicación, número de empleados, tipo de productos fabricados (INEGI, 2010). Esta base servirá para identificar a las

empresas que correspondan con las categorías incluidas en la metodología del IPCC.

Base de datos de 1996. Esta base es el resultado de una encuesta que se aplicó en 1996 a las principales empresas del sector manufacturero de San Luis Potosí. En ésta se encuentran datos específicos de las empresas, entre otros: nombre de la empresa, giro industrial, tipo de productos elaborados, tipo y cantidad de materias primas requeridas en el proceso, número de empleados, el tipo y consumo de combustibles. Esta base fue una aportación especial de la Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal.

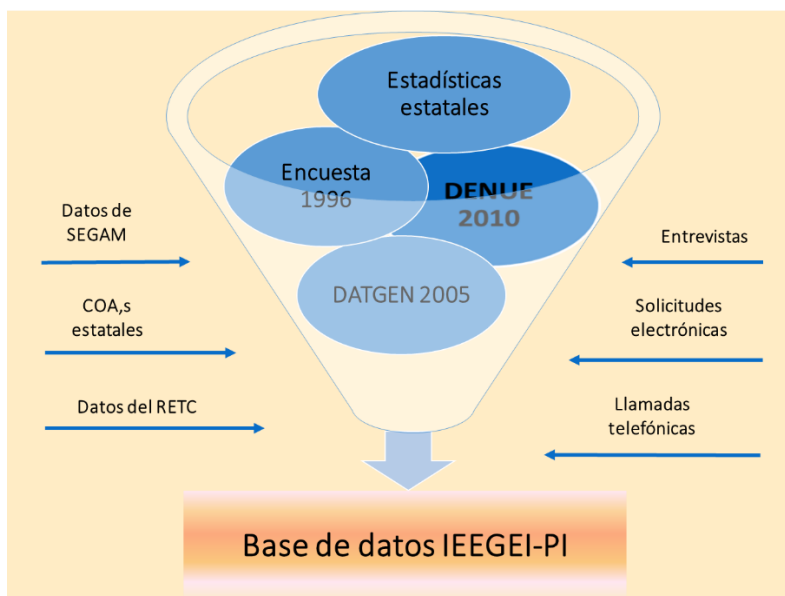


Figura 2.6. Esquema integrador de las fuentes de información y los recursos utilizados en el inventario de GEI para el sector de procesos industriales de San Luis Potosí.

Base de datos 2005 (DATGEN). Esta base electrónica contiene información de algunas empresas de San Luis Potosí, que se encuentran integradas en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). En ésta se encuentran datos, tales como: nombre de la empresa, tipo y cantidad de productos elaborados,

tipo y cantidad de materias primas utilizadas, tipo y cantidad de combustibles. La base se obtuvo por medio de la gestión que se llevó a cabo con el INE.

Estadísticas estatales. La información agregada a nivel estatal sirve para aplicar los procedimientos de control de calidad, al compararla con respecto a la información de las bases antes mencionadas e identificar la presencia de datos erróneos, respecto a tipos de productos o volúmenes de producción. La mayoría de las estadísticas nacionales y estatales se obtienen del Instituto Nacional de Geografía (INEGI) y de la Secretaría de Economía (SE).

Base de datos de cédulas de operación anual estatales (COA's). De estas cédulas se obtiene información con más detalle que las bases anteriores, ya que contienen información relativa a los tipos y cantidades de las materias primas utilizadas y de los combustibles, así como datos técnicos sobre los equipos de combustión utilizados en el proceso.

Entrevistas directas. Se aplicará una encuesta breve en los pequeños y medianos establecimientos dedicados a la fabricación de productos metálicos básicos, ya que se considera una categoría de fuentes principales en la emisión de GEI.

Solicitudes electrónicas. Se utilizará este medio para solicitar, de manera oficial, la información necesaria a cada una de las empresas instaladas en el estado, y que además, se encuentran enmarcadas en las categorías, según la clasificación de las Directrices del IPCC.

Factores de emisión (FE).

La Guía del IPCC y los Manuales de GBP proporcionan FE por defecto para todas las fuentes, y factores de conversión para las fuentes principales; sin embargo, en esta tesis se examinará la existencia de posibles FE nacionales e inclusive, la posibilidad de factores fuente-específico.

Para calcular las emisiones de GEI indirectos, generadas por el uso de combustible en los procesos industriales, se utilizarán los FE recomendados y otorgados por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA-DF); que están basados, en su mayoría, en los FE indicados en el compendio AP-42 de la US-EPA (Tabla 2.1). Estos FE corresponden a la masa del gas emitido por el volumen de combustible utilizado en equipos de combustión estacionaria, como calderas y hornos industriales con capacidad de menos de 3 000 caballos caldera.

2.3.3. Cálculo de las emisiones

La selección de un método particular para calcular las emisiones dependerá de la disponibilidad de DA; así como de los recursos financieros y humanos disponibles para terminar el inventario. En la terminología del IPCC, el método jerárquico más bajo o el más sencillo es el “Nivel 1”, mientras que los más detallados son el “Nivel 2” o el “Nivel 3” (Figura 2.7).

Tabla 2.1. Factores de emisión de los combustibles utilizados en el sector industrial de San Luis Potosí. Elaboración propia con datos de US-EPA (2012), IPCC (1997), y SMA- DF (2006).

GEI	Combustóleo	Diesel	Gas LP	Gas natural	Coke de petróleo	Bagazo de caña
	ton/m ³	ton/m ³	ton/m ³	ton/m ³	ton/ton	ton/ton
CO ₂	2,93E+00	2,53E+00	1,50E+00	2,22E-03	2,99E+00	7,06E-01
CH ₄	1,14E-04	1,02E-04	1,02E-04	3,96E-08	9,20E-05	2,12E-04
N ₂ O	2,27E-05	2,05E-05	2,37E-06	3,96E-09	1,84E-05	2,82E-05
NO _x	6,60E-03	2,44E-03	1,66E-03	3,76E-06	9,98E-03	5,44E-04
CO	6,00E-04	6,00E-04	9,43E-04	1,34E-06	2,26E-03	ND
SO ₂	7,16E-02	5,11E-04	3,70E-06	9,61E-09	9,82E-02	ND
COVDM	1,43E-04	4,00E-05	8,06E-05	8,80E-08	1,97E-05	ND

El proceso de estimación de emisiones es iterativo; es decir, después de que se evalúan la disponibilidad y calidad de datos se elige un método inicial, pero la recolección de datos continúa y se descubren más o menos datos, tal vez de mayor calidad o nivel de desagregación, y entonces se elige finalmente entre el método

inicial u otro distinto (o enfoque distinto con el mismo método). Las guías del IPCC contienen árboles de decisión (Figura 2.8), para las diferentes categorías, que son de gran utilidad para orientar en la elección del método adecuado.

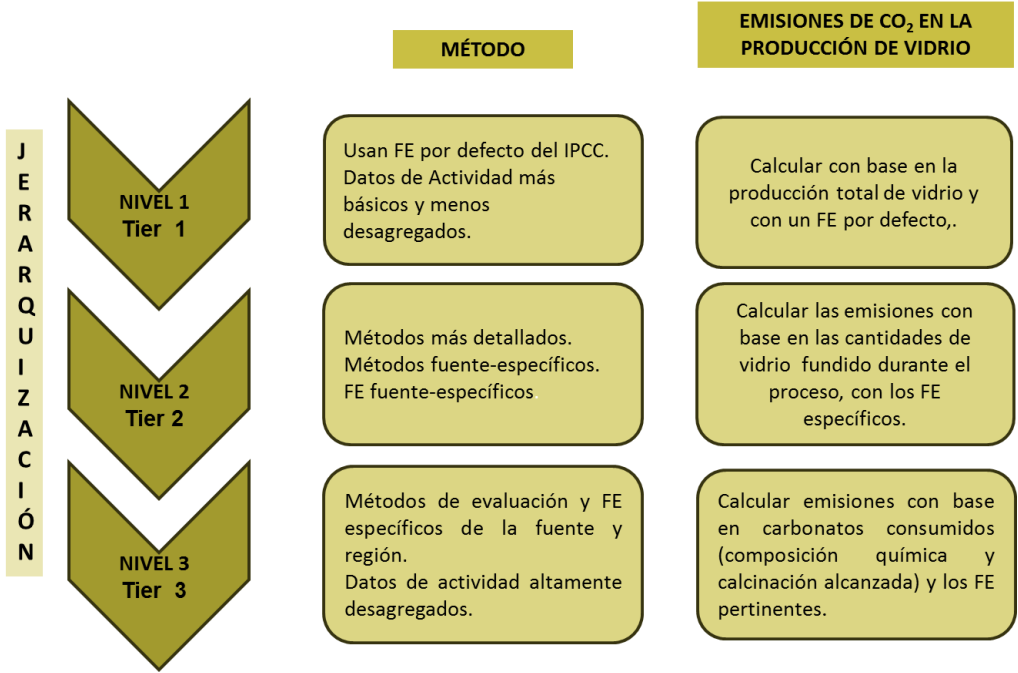


Figura 2.7. Esquema de jerarquización de los métodos para el cálculo de emisiones de GEI (IPCC, 1997).

La base de la estimación es la misma, independientemente del método; la diferencia estriba en el nivel de desagregación de los datos. Asumiendo que no se cuenta con equipo de control de emisiones al aire, la manera más básica de estimar la emisión de una fuente específica, se calcula a partir de la ecuación:

$$\text{Emisión} = \text{Dato de actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

$$E = DA \times FE \tag{2.1}$$

Para el presente IEEGEI-PI se tomará como año base el 2005, debido a que los datos correspondientes a la base DATGEN son los más completos. Para los años que no cuenten con información se utilizarán los datos sustitutos más pertinentes,

dependiendo de cada categoría, a fin de efectuar las proyecciones necesarias. El IPCC sugiere el uso de datos sustitutos, siempre y cuando la estimación se vincule a la fuente de datos estadísticos que explique mejor las variaciones de la categoría a través del tiempo; por ejemplo, las emisiones industriales pueden relacionarse con los niveles de producción del ramo o sector correspondiente (IPCC, 1997).

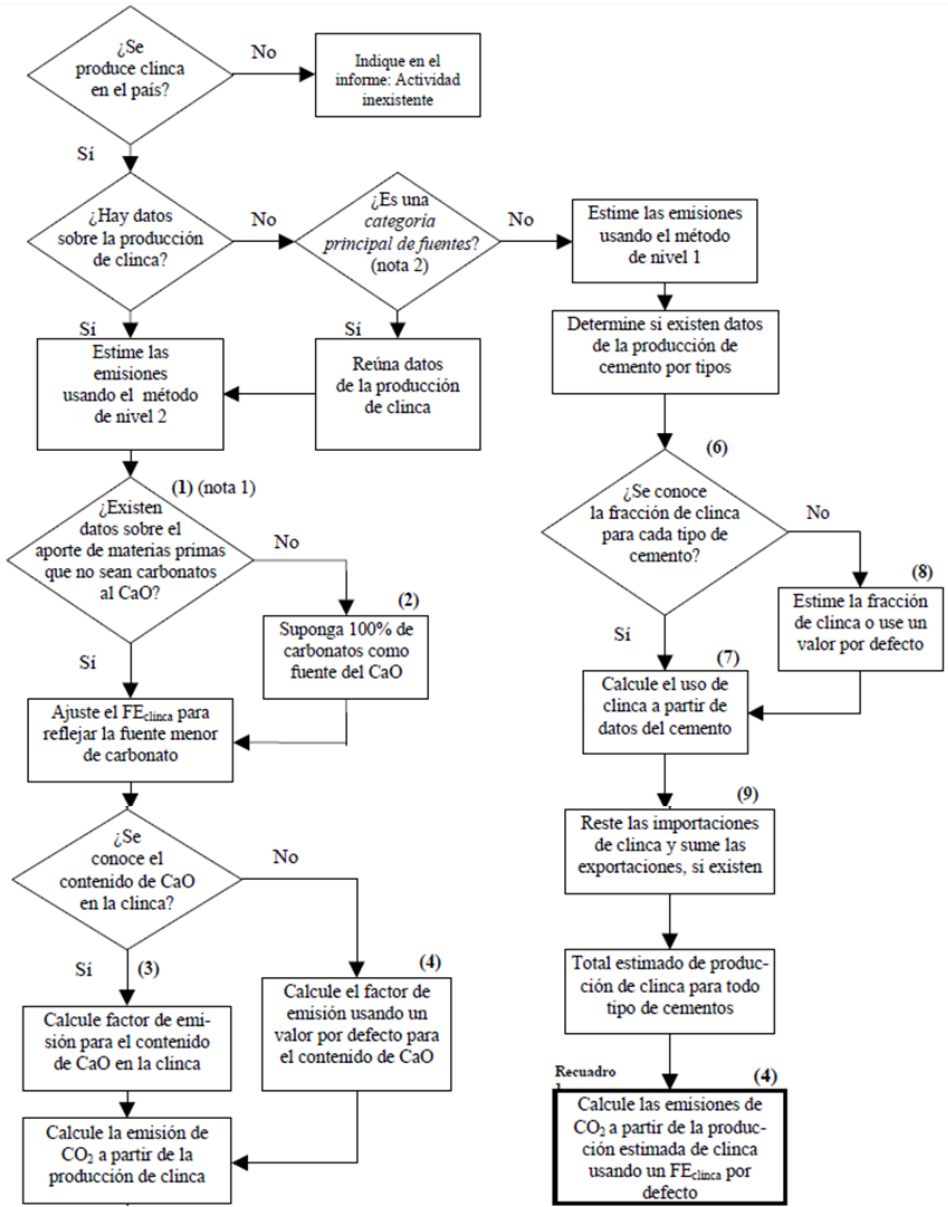


Figura 2.8. Ejemplo de un árbol de decisión para definir el método de cálculo de emisión (IPCC, 1997).

2.3.4. Calculo de la incertidumbre

De acuerdo con las guías GBP del IPCC, la estimación de la incertidumbre es un elemento esencial de un inventario de emisiones completo; por esto, las guías orientan sobre "La Cuantificación de las Incertidumbres en la Práctica", y describen métodos para su estimación (INE, 2002). Esos métodos utilizan una combinación de datos empíricos y criterios de expertos, dependiendo de su disponibilidad; permiten estimar la contribución relativa de la categoría de fuente a la incertidumbre general de las estimaciones de inventarios nacionales, en términos de las tendencias así como del nivel absoluto (IPCC, 2000).

Cabe señalar que el cálculo de la incertidumbre no es para determinar la validez de los resultados del inventario, sino para definir a las categorías de fuente a las que deben enfocarse los esfuerzos futuros para aumentar la exactitud del inventario.

Para el inventario desarrollado en esta tesis, se utilizará la metodología del nivel 1: Estimación de las incertidumbres por categoría de fuentes con supuestos simplificados, recomendado en el capítulo 6 de la Guía de las Buenas Prácticas del IPCC. Con base en la metodología se calcularán los valores de incertidumbre asociados a las estimaciones anuales de emisiones y a su tendencia en el transcurso del tiempo. Cabe señalar que el cálculo de incertidumbres sólo se realizará para las categorías que cuenten con la información necesaria para tal efecto.

2.3.5. Control de calidad y garantía de calidad (CC/GC)

Un buen plan de CC/GC es importante en el desarrollo de un inventario de GEI fiable, justificable y preciso. La escala del plan de CC/GC dependerá de los recursos disponibles, pero se prevé que los procedimientos de CC/GC incluyan, como mínimo, los de revisión internos y rutinarios, a saber: controles al azar de las hojas de cálculo para verificar la entrada de datos correctos, fórmulas coherentes y

documentación completa; y por lo menos una ronda de revisión externa por pares, como actividad de garantía de calidad (IPCC, 2000).

Se aplicarán las técnicas generales de CC: detección de la ocurrencia de errores de transcripción en las entradas de cada cifra, verificación para asegurar que las emisiones hayan sido calculadas correctamente, revisión para confirmar que los factores de conversión y las unidades utilizadas hayan sido las correctas, comprobación sobre la coherencia de los datos entre categorías de fuentes, entre otras.

Se aplicarán también procedimientos específicos de CC para los datos de actividad; por ejemplo, comparación del requerimiento energético en la producción de cemento para verificar que la cantidad de combustible indicada en las bases de datos sea congruente con la cantidad del producto indicado en las mismas. Además, cruzar información de los índices de producción por categoría respecto a los estatales o nacionales; elaboración de gráficas para detectar diferencias en parámetros relativos (unidades energéticas por unidad de producción) entre las empresas de la misma categoría (IPCC, 2000).

2.4 Resultados

A continuación se presentan los resultados del IEEGEI-PI. Para cada categoría de fuente se incluye: estadísticas sobre la dinámica de su participación en la economía estatal, la descripción y un diagrama de flujo sobre el proceso de producción en el que se indica el punto de generación de las emisiones al aire; la aplicación de la metodología para el cálculo de las emisiones de GEI, y la estimación de la incertidumbre.

2.4.1. Emisiones en la producción de cemento: subcategoría 2A1

El cemento es un material aglutinante con finura similar al talco, formado por diversos cristales y vidrios que al mezclarse con el agua producen una jalea de hidrosilicatos de calcio. Es un material capaz de unir fragmentos pétreos para formar un conglomerado moldeable, durable, resistente e impermeable a voluntad, adaptable a diversos usos (SE, 2005).

Las emisiones de CO₂ se generan durante la producción de clinker, que es un componente intermedio en el proceso de fabricación del cemento. Durante la producción de clinker se calcina la piedra caliza, que es principalmente (95%) carbonato de calcio (CaCO₃), para producir cal (CaO), y se emiten cantidades importantes de CO₂ al aire (Figura 2.9). Posteriormente, el CaO reacciona con los óxidos de sílice, aluminio y hierro de la materia prima para formar los minerales de clinker, pero esas reacciones no emiten más CO₂ (GBP, 2002).

Por otra parte, también se generan emisiones por el combustible utilizado en los hornos, cuyas emisiones dependen del FE atribuible según el tipo de combustible utilizado, que puede ser coque, combustóleo, diésel o gas natural.

La industria del cemento en México y San Luis Potosí.

En México existen seis empresas productoras de cemento con 31 plantas instaladas en 18 estados de la república, las cuales tienen una capacidad instalada de 53,8 millones de toneladas anuales. Entre el periodo 2000-2011, la tasa anual de variación (TAV) promedio de la producción de cemento a nivel nacional se había mantenido en un 3%, hasta el 2007 (Gráfica 2.5); sin embargo, debido a la crisis económica mundial del 2008, se observó un decremento significativo (CANACEM, 2012).

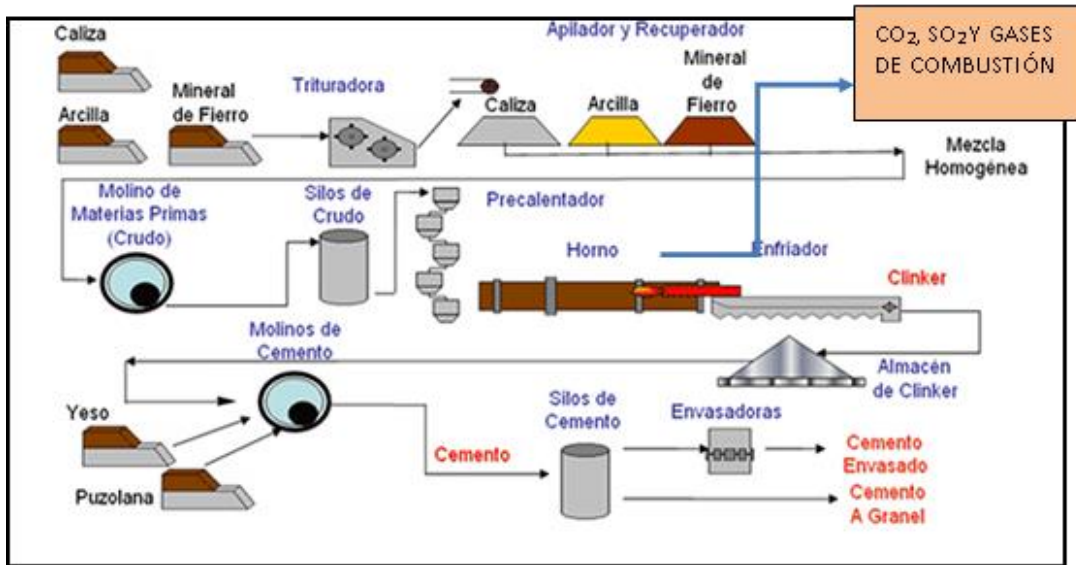
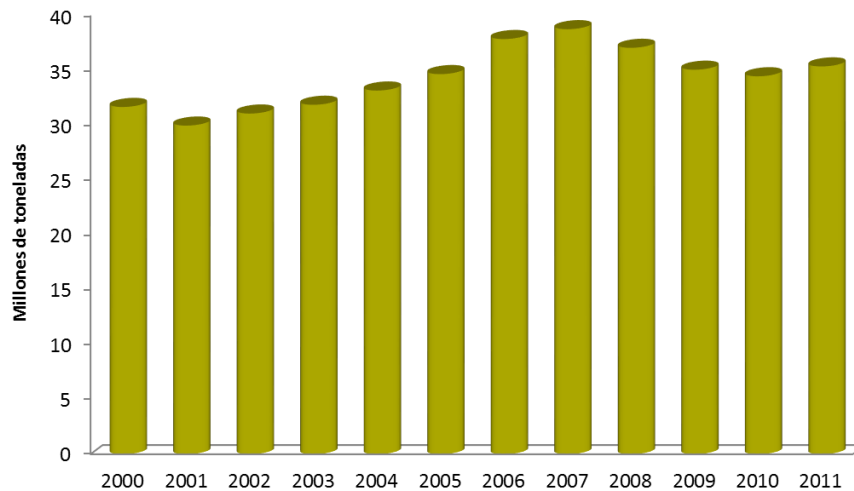


Figura 2.9. Diagrama del proceso de la producción de cemento (CANACEM, 2012).

En el caso específico de San Luis Potosí, para el 2000, inicio del periodo de estudio, se contaba con dos plantas cementeras ubicadas en los municipios de Valles y Tamuín, y en el 2004 la producción de cemento experimentó un incremento significativo, debido a la instalación de una tercera planta de este sector, ubicada en el municipio de Cerritos.



Gráfica 2.5. Dinámica de la producción de cemento en México. Elaboración propia con datos de CANACEM (2012).

Estimación de las emisiones de CO₂ en el proceso industrial (PI) del cemento.

Datos de actividad. Las emisiones de CO₂ se generan por la calcinación del carbonato de calcio contenido en la caliza; por lo tanto, en caso de conocer la cantidad de caliza utilizada en el proceso, se tiene el DA necesario para calcular de una manera confiable, a nivel fuente-específico, las emisiones de CO₂; por lo que se puede utilizar un FE directo por estequiometría, reemplazando con esto el método propuesto del IPCC, el cual se basa en el uso de un FE por la cantidad de clinker producido.

En San Luis Potosí existen tres empresas productoras de cemento. Una de ellas, la de más reciente creación, proporcionó los datos de sus emisiones de CO₂, debidas específicamente al proceso de descarbonatación de la piedra caliza. Para las otras dos empresas se tomó en cuenta la cantidad de piedra caliza utilizada en el proceso, cuyo dato fue tomado de la base DATGEN del 2005, y se utilizó la TAV de la producción de cemento a nivel nacional, como dato sustituto para estimar retro y prospectivamente los demás años del inventario.

Factor de emisión. Debido a que la estimación se obtendrá en función de la cantidad de piedra caliza utilizada en el proceso, el FE utilizado se basa en la razón del peso molecular del CaCO₃ y el CO₂; esto es, un FE de 0.44 toneladas de CO₂ por tonelada de caliza. Con estos datos, desagregados a un nivel Tier 3, se realizaron las estimaciones de las emisiones de CO₂ para el periodo considerado (Tabla 2.2). Por ejemplo, para las emisiones generadas durante el 2000, se aplicó la ecuación 2.1 descrita en la metodología, como sigue:

$$E = DA \times FE = 2\,351\,176 (0,44) = 1\,034\,518 \text{ ton}$$

Cabe señalar que la decisión de usar directamente el FE antes mencionado, en lugar del sugerido por las Directrices del IPCC 1996, se tomó una vez que se hicieron comparaciones con las emisiones de CO₂ que fueron proporcionadas

directamente por una de las empresas. Al comparar las emisiones utilizando la cantidad de piedra caliza como DA, la estimación fue más precisa (más cercana a la información de la empresa) que la obtenida al usar la cantidad de clinker como DA (el sugerido por las Directrices del IPCC).

Tabla 2.2. Toneladas de CO₂ emitidas en la producción de cemento en San Luis Potosí.

Año	Piedra Caliza	Emisiones CO₂
	ton	ton
2000	2 351 176	1 034 518
2001	2 225 081	979 036
2002	2 306 668	1 014 934
2003	2 366 007	1 041 043
2004	3 078 416	1 354 503
2005	5 050 972	2 222 428
2006	5 353 625	2 355 595
Total	22 731 946	10 002 056

Estimación de las emisiones de SO₂ en el PI de cemento.

Las emisiones de SO₂ en la producción de cemento se generan por la arcilla utilizada como materia prima. Para estimar estas emisiones se aplica un FE en función del SO₂ liberado por tonelada de cemento producido. El FE sugerido por el IPCC en el Manual de Referencia es de 0,3 kg SO₂/ton cemento. La producción anual de cemento de cada una de las empresas de esta subcategoría se adquirió de la misma forma que en la estimación del CO₂. Finalmente, se aplicó el FE del SO₂, para estimar las emisiones de SO₂ durante el periodo de estudio (Tabla 2.3).

Cálculo de la incertidumbre en la estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de cemento.

Dato de actividad. De la base DATGEN se obtuvieron las cantidades de materia prima utilizada en las tres plantas cementeras del estado, de tal manera que al conocer la cantidad de piedra caliza utilizada, se conoce con un alto grado de

certeza las emisiones de CO₂. Para este caso, las Directrices del IPCC 2006, sugieren una incertidumbre del 2% (basado en el pesaje de las materias primas); sin embargo, para el resto de los años, donde la cantidad de caliza utilizada se estimó utilizando como dato sustituto la producción de cemento a nivel nacional, se obtuvo un coeficiente de variación ponderado del 5,33% en los datos de actividad.

Tabla 2.3. Emisiones de SO₂ en San Luis Potosí, generadas en la producción de cemento.

Año	Cemento	Emisiones SO₂
	ton	kg
2000	2 031 032,29	609 309,69
2001	1 922 106,51	576 631,95
2002	1 992 584,22	597 775,27
2003	2 043 843,82	613 153,15
2004	3 334 802,32	1 000 440,70
2005	3 485 479,60	1 045 643,88
2006	3 806 143,72	1 141 843,12
Total	18 615 992,48	5 584 797,74

Factor de emisión. Debido a que el FE corresponde a la emisión generada, específicamente, por la calcinación de los carbonatos utilizados en el proceso; es decir, la transformación de la piedra caliza (CaCO₃) en óxido de calcio (cal), las Guías GBP asignan una incertidumbre baja del 2%, debido al nivel Tier 3 utilizado.

Estimación de las emisiones de GEI por el uso de combustible en el proceso industrial (UCPI) del cemento.

Como se mencionó anteriormente, una de las empresas cementeras proporcionó la información de sus emisiones anuales de CO₂, para el periodo 2004-2006, desglosadas en las generadas por el uso de combustible y las liberadas por el proceso. De esta información se obtuvo que, en promedio, el 34% de las emisiones generadas en la producción de cemento fueron atribuibles al uso de combustible, que es un porcentaje dentro del rango de las emisiones imputables al uso de

combustible en la producción de cemento (Ali, Saidur, & Hossain, 2011; Anand, Vrat, & Dahiya, 2006).

De la base del RETC, se conocieron las emisiones totales de las otras dos empresas para el período 2004-2006, a las cuales se les aplicó la proporción de 34% para estimar las emisiones generadas por el uso de combustible, asumiendo una similitud en los procesos. Para hacer la estimación de los años 2000-2003 se utilizó el dato sustituto de la TAV de la producción nacional de cemento (CANACEM, 2013).

Los FE utilizados corresponden al uso de combustóleo durante el 2000 y 2001, y al coque de petróleo a partir del 2003. Por ejemplo, para estimar las emisiones de CO₂ por el uso de combustóleo durante el 2001, se aplicó su respectivo FE como sigue:

$$E = DA \times FE = (162\ 171,84)(3,1135) = 504\ 922\ ton$$

Los resultados pueden variar por las fracciones utilizadas en los cálculos realizados en la base de datos electrónica. Los FE de los combustibles se mostraron anteriormente en la tabla 2.1.

Finalmente, se aplicaron los potenciales de calentamiento del CH₄ y el N₂O, para estimar las emisiones de CO_{2e} generadas por el uso de combustible (Tabla 2.4). Por ejemplo, las emisiones de CO_{2e} generadas durante el 2000, se estimaron como sigue:

$$CO_{2e} = 533\ 540 + (20,68)(21) + (4,14)(310) = 535\ 257\ ton$$

El principal combustible utilizado en la industria cementera es el coque de petróleo; sin embargo, también se utilizan cantidades menores de diesel y combustóleo con propósitos de arranque de los equipos de combustión en el proceso de producción. Según la SENER, el uso de coque en este giro industrial comenzó a utilizarse a partir del 2002, por lo que los años anteriores el combustible principal era el combustóleo

Tabla 2.4. Toneladas de CO₂e emitidas por el uso de combustible en la producción de cemento en San Luis Potosí.

Año	Coque	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ e
2000	*171 361	533 540	21	4	535 257
2001	*162 171	504 928	20	4	506 552
2002	174 865	522 990	16	3	524 325
2003	179 364	536 443	17	3	537 813
2004	233 742	699 079	22	4	701 259
2005	390 723	1 168 578	36	7	1 171 951
2006	412 542	1 233 836	38	8	1 237 412
Total		5 199 394	168	34	5 214 569

*metros cúbicos de combustóleo. El coque se utilizó a partir del 2002.

Por otra parte, también se aplicaron los FE correspondientes para calcular las emisiones de los GEI indirectos, generadas por el uso de combustible en la producción del cemento (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Toneladas de GEI indirectos emitidas por el uso de combustible en la producción de cemento en San Luis Potosí.

Año	Coque	CO	NO _x	COVDM	SO ₂
2000	*171 361	103	1 131	25	12 268
2001	*162 171	97	1 070	23	11 610
2002	174 865	40	1 745	3	17 180
2003	179 364	41	1 790	4	17 622
2004	233 742	53	2 333	17	22 965
2005	390 723	89	3 899	22	38 388
2006	412 542	94	4 117	25	40 531
Total		516	16 086	119	160 564

2.4.2. Emisiones en la producción de cal: subcategoría 2A2

La cal es el producto que se obtiene al calcinar la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. En ese estado se denomina cal viva (óxido de calcio) y si se apaga sometiéndola al tratamiento de agua, se le llama cal apagada (hidróxido de calcio). La producción de cal supone una serie de pasos

comparables a los de la producción de clinker de cemento Portland. Estos pasos incluyen la extracción, trituración y clasificación volumétrica de la materia prima (Figura 2.10); así como su calcinación a temperaturas muy elevadas (~ 1100° C). Las emisiones de CO₂ se generan en este proceso de calcinación, tanto por el uso de combustibles fósiles, como por la transformación misma de la materia prima.

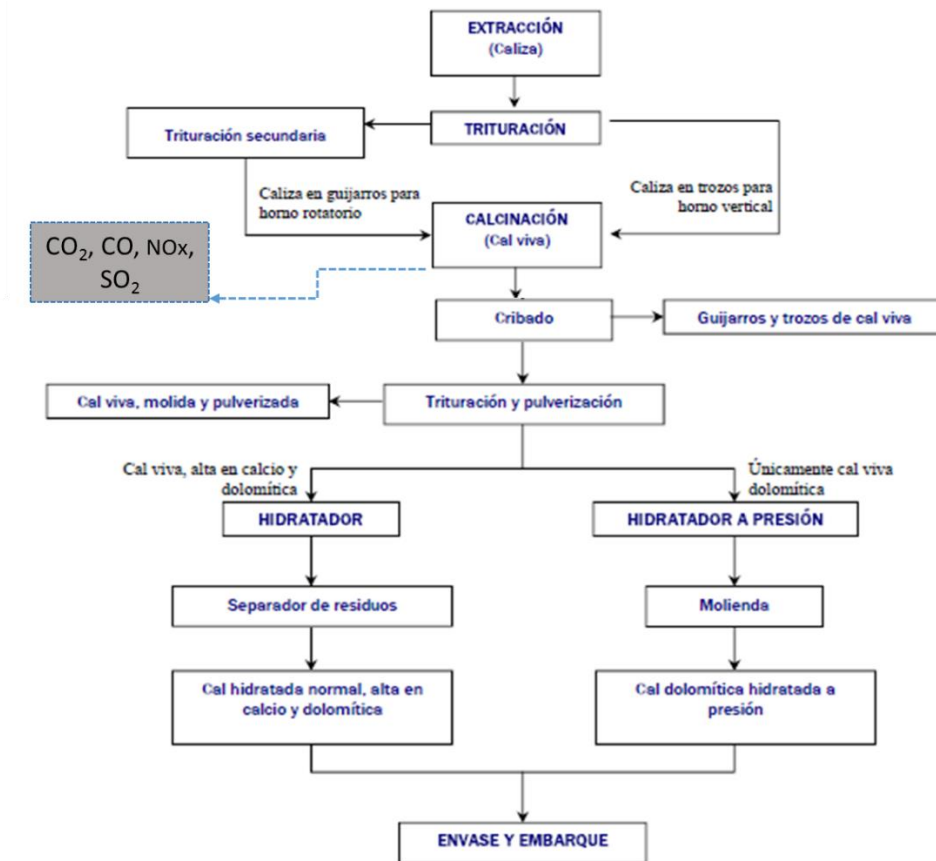
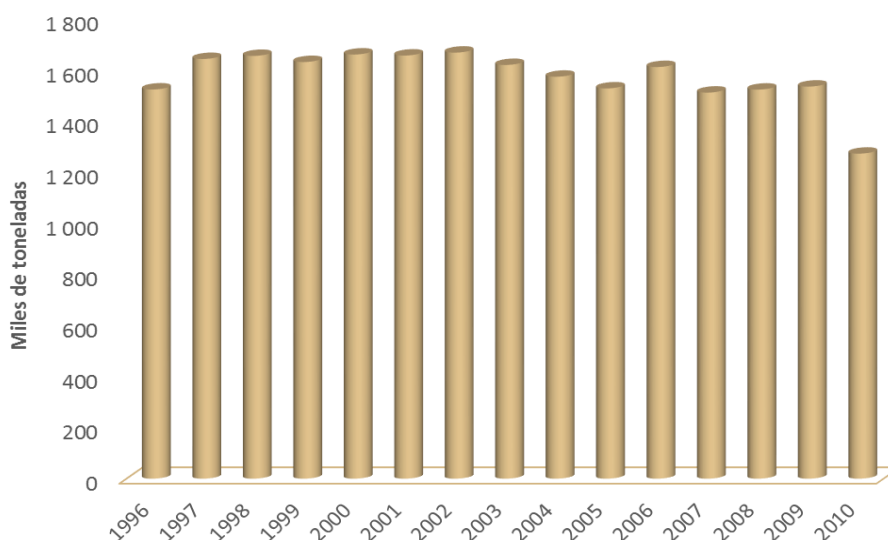


Figura 2.10. Proceso de producción de cal (Dirección General de Promoción Minera, 2005).

La producción de cal en México.

Entre 1997 y 2004, la producción de cal en México se mantuvo en 1 600 000 toneladas anuales en promedio; sin embargo, a partir del 2005 se observó una ligera reducción que se acentuó aún más en el 2010 (Gráfica 2.6). Por su parte, en San Luis Potosí se encuentran instaladas importantes productoras de cal,

específicamente de cal hidratada, que es destinada a la industria de la construcción. De hecho, el estado es reconocido a nivel nacional como uno de los principales productores de piedra caliza, materia prima base de la cal, que con una media anual de 4 022 944 toneladas (2002-2008), contribuye con el 6,35% de la producción nacional (SE, 2007 y 2010).



Gráfica 2.6. Producción anual de cal hidratada en México. (Elaboración propia, con datos del INEGI, 2010).

Estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de cal.

En la estimación de las emisiones de CO₂ liberadas durante la producción de cal, se aplica un FE de CO₂ por tonelada de cal producida. Este FE está dado por la relación estequiométrica de los componentes de la cal y el dióxido de carbono (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Factores de emisión para la producción de cal (IPCC, 1996).

Proceso	GEI	Factor de emisión
Horno de cal, alimentado con calcita	CO ₂	0,79 ton de CO ₂ / ton de cal viva producida
Horno de cal, alimentado con dolomita	CO ₂	0,91 ton de CO ₂ / ton de cal dolomítica producida

Para la estimación de las emisiones de CO₂ de esta subcategoría de fuente, no se obtuvieron las cantidades de cal producidas por cada una de las empresas dedicadas a este giro, por lo que se realizó una estimación a nivel estatal, siguiendo el procedimiento que a continuación se describe:

1. Del inventario nacional de emisiones de GEI (INEGEI) del 2002, se tomaron los datos bianuales de la cantidad de piedra caliza y cal producidos entre 1992 y 2006. Estos datos se utilizaron para analizar, por medio del software Minitab, la relación lineal entre las variables (Gráfica 2.8).
2. En la gráfica se observa un coeficiente de determinación del 0,9070, y al extraer su raíz cuadrada se obtiene un coeficiente de correlación de 0,9523 (ver anexo 1). Este último, indica una asociación significativa entre las producciones de cal y piedra caliza a nivel nacional durante el periodo 1992-2006. Una vez que se probó lo anterior, se procedió a calcular la contribución de la piedra caliza en la producción de cal; esto es, conocer el porcentaje de la piedra caliza que se destina para la producción de cal, a nivel nacional. Tal contribución se calculó en un 8%.
3. De los anuarios estadísticos de la minería mexicana, edición 2001 y 2007, se obtuvieron los datos anuales sobre la cantidad de piedra caliza producida en San Luis Potosí, a los cuales se les atribuyó un porcentaje del 8% destinado a la producción de cal.

Finalmente, de acuerdo al panorama minero del estado de San Luis Potosí (SE, 2011), la extracción de dolomita no resulta significativa en comparación con la cantidad de la piedra caliza extraída en el estado. Por lo tanto, para la estimación de las emisiones de CO₂ se utilizó el FE de 0,79 ton CO₂/ ton de cal viva producida (Tabla 2.7).

Cálculo de la incertidumbre en la estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de cal.

Dato de actividad. Para la asignación de la incertidumbre en esta estimación se consideró la proporción de variabilidad que no fue explicada por el modelo de regresión que se construyó para la relación entre las cantidades de cal y caliza; esto es, como el coeficiente de determinación fue del 90,7%, el restante 9,3% se tomó como la incertidumbre del DA en cuestión.

Tabla 2.7. Emisiones de CO₂ generadas en la producción de cal en San Luis Potosí.

Año	Caliza	Cal	Emisiones CO₂
	ton	ton	ton
2000	5 015 829	401 266	317 000
2001	3 598 205	287 856	227 407
2002	3 333 314	266 665	210 665
2003	2 918 200	233 456	184 430
2004	3 914 020	313 122	247 366
2005	4 299 258	343 941	271 713
2006	5 073 030	405 842	320 615
Total	28 151 856	2 252 149	1 779 197

Factor de emisión. Se asignó una incertidumbre del 2%, que es la recomendada en la guía de las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre del IPCC 1996. Como se observa es una incertidumbre baja, dado que la estimación de las emisiones está basada en las entradas de piedra caliza (carbonatos) al proceso.

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI en la producción de cal.

Los datos sobre el tipo y la cantidad de combustible utilizados en la fabricación de cal se tomaron de la base de datos de 1996. Posteriormente, se hizo una proyección para estimar el combustible para los años del inventario (2000-2006), para lo cual se utilizó como dato sustituto la tasa de variación anual en la producción nacional de cal (INEGEI, 2010). Al estimar la cantidad de combustóleo, se aplicaron los FE y

el poder de calentamiento correspondientes para obtener las emisiones generadas por esta subcategoría (Tabla 2.8 y 2.9).

Tabla 2.8. Toneladas de CO₂e generadas por el uso de combustible en la producción de cal en San Luis Potosí.

Año	*CBL	FE CO ₂	CO ₂	FE CH ₄	CH ₄	FE N ₂ O	N ₂ O	CO ₂ e
	m ³	ton CO ₂ /m ³	ton	ton CH ₄ /m ³	ton	ton N ₂ O/m ³	ton	ton
2000	34 470	3,11	107 323,90	1,21E-04	4,16	2,41E-05	0,83	107 669
2001	24 728	3,11	76 990,94	1,21E-04	2,98	2,41E-05	0,60	77 239
2002	22 907	3,11	71 323,05	1,21E-04	2,76	2,41E-05	0,55	71 553
2003	20 055	3,01	60 457,82	1,17E-04	2,34	2,34E-05	0,47	60 652
2004	26 898	3,11	83 696,04	1,21E-04	3,24	2,41E-05	0,65	83 965
2005	29 546	2,93	86 623,31	1,14E-04	3,36	2,27E-05	0,67	86 902
2006	34 863	2,93	102 213,61	1,14E-04	3,96	2,27E-05	0,79	102 542

Tabla 2.9. Emisiones de GEI indirectos, generadas por el uso de combustible en la producción de cal en San Luis Potosí.

Año	CBL	CO	NO _x	COVDM	SO ₂
	m ³	ton	ton	ton	ton
2000	34 470	20,68	227,50	2,93	2 467,78
2001	24 728	14,84	163,20	2,10	1 770,31
2002	22 907	13,74	151,19	1,95	1 639,99
2003	20 055	12,03	132,36	1,70	1 435,75
2004	26 898	16,14	177,53	2,29	1 925,69
2005	29 546	17,73	195,00	2,51	2 115,23
2006	34 863	20,92	230,10	2,96	2 495,93

2.4.3. Emisiones por el uso de piedra caliza y dolomita: subcategoría 2A3

Las aplicaciones industriales en las cuales se somete la piedra caliza o la dolomita a temperaturas elevadas, dan lugar a emisiones de CO₂. En esta subcategoría se consideran a aquéllas empresas que, no habiendo sido consideradas en alguna otra categoría específica, deben incluirse en el inventario ya que por el uso, así como por el proceso mismo de sus materias primas, se generan emisiones de CO₂.

En el estado de San Luis Potosí se detectaron al menos dos grandes empresas comprendidas en esta subcategoría, que durante sus procesos de manufactura hacen uso de la piedra caliza. Estas iniciaron operaciones en el 2002 y 2003, y su actividad industrial consiste en la producción de pisos cerámicos.

Producción de piso cerámico. Dentro de las diferentes fases para la producción de piso cerámico, se encuentra la cocción de las losetas, que es donde se liberan las emisiones de CO₂, generadas por el uso de piedra caliza como materia prima (Figura 2.11). Además del CO₂, se emiten gases de combustión, debido al uso de carburante en el horno.

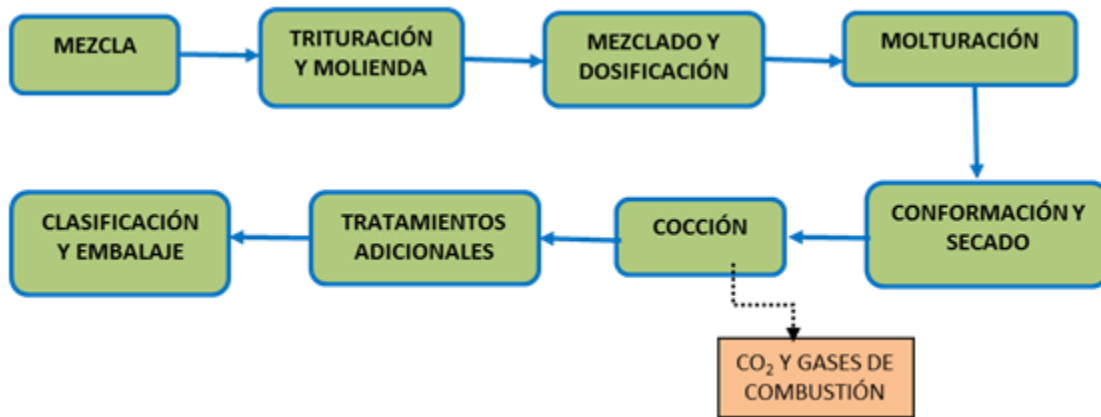


Figura 2.11. Flujo del proceso de producción de piso cerámico.

Estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de piso cerámico.

Datos de actividad. De la base DATGEN, se obtuvieron las cantidades de piedra caliza utilizadas por las empresas productoras de piso cerámico. Para estimar las cantidades de los años faltantes para el periodo del inventario, se hicieron retro y prospectivas, utilizando como dato sustituto la tasa anual de variación (TAV) de la producción bruta nacional de piso cerámico, cuyos datos se tomaron de la encuesta industrial anual (INEGI, 2002, 2004, 2006 y 2008).

Factor de emisión. El FE utilizado para la estimación de las emisiones es 440 kg de CO₂ por tonelada de piedra caliza utilizada, que es el sugerido en las Directrices

(Tabla 2.10). Debido a que se obtuvo la información relativa a la cantidad de los carbonatos utilizada en el proceso, se logró un nivel de estimación Tier 3.

Tabla 2.10. Toneladas de CO₂ emitidas en San Luis Potosí, por el uso de piedra caliza en la producción de piso cerámico.

Año	Caliza	Emisiones CO ₂
2000	NE	NE
2001	NE	NE
2002	20,32	8,94
2003	37,64	16,56
2004	40,01	17,60
2005	41,79	18,39
2006	43,96	19,34

NE= No existente

Cálculo de la incertidumbre en la estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de piso cerámico.

Datos de actividad. La incertidumbre calculada para los datos de actividad es del 4%, que se obtuvo promediando el coeficiente de variación calculado de las emisiones anuales para cada empresa.

Factor de emisión. Para el factor de emisión se consideró una incertidumbre del 2%, tomado de las guías de las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre del IPCC (GBP).

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI en la producción de piso cerámico.

De la base DATGEN se obtuvo la información sobre el tipo y cantidad de combustible utilizado por las dos empresas de esta subcategoría. Para estimar las cantidades de los años faltantes para el periodo del inventario se hicieron retro y prospectivas, utilizando como dato sustituto la TAV de la producción bruta nacional para el producto en cuestión. Las emisiones de CO_{2e} por el uso de combustible en

esta subcategoría se basaron en los FE de los dos combustibles utilizados por las empresas (Tabla 2.11).

Tabla 2.11. Emisiones de CO₂e generadas por el uso de combustible en la producción de piso cerámico en San Luis Potosí (ton).

Combustible	Unidades	2002	2003	2004	2005	2006
Gas natural	m ³	27 554 809	48 812 097	51 882 454	54 191 754	57 003 590
FE CO₂	ton CO ₂ /m ³	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03
Emis CO₂	ton	61 282,68	108 559,49	115 388,05	120 524,00	126 777,60
FE CH₄	ton CH ₄ /m ³	3,96E-08	3,96E-08	3,96E-08	3,96E-08	3,96E-08
Emis CH₄	ton	1,09	1,94	2,06	2,15	2,26
FE N₂O	ton N ₂ O/m ³	3,96E-09	3,96E-09	3,96E-09	3,96E-09	3,96E-09
Emis N₂O	ton	0,11	0,19	0,21	0,21	0,23
Emis CO₂e	ton	61 339,48	108 660,12	115 495,01	120 635,72	126 895,11
Diesel	m ³	125	147	157	164	172
FE CO₂	ton CO ₂ /m ³	2,59E+00	2,60E+00	2,68E+00	2,53E+00	2,53E+00
Emis CO₂	ton	323,92	383,64	420,86	414,31	435,81
FE CH₄	ton CH ₄ /m ³	1,05E-04	1,05E-04	1,09E-04	1,02E-04	1,02E-04
Emis CH₄	ton	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
FE N₂O	ton N ₂ O/m ³	2,10E-05	2,11E-05	2,17E-05	2,05E-05	2,05E-05
Emis N₂O	ton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emis CO₂e	ton	325,01	384,93	422,27	415,71	437,28

A partir del 2003, se observó un importante incremento en el volumen de gas natural, debido la instalación de la segunda empresa productora de piso cerámico en la ciudad de San Luis Potosí.

Se estimaron las emisiones de los GEI indirectos generadas por el uso de combustible (Tabla 2.12). Los FE utilizados se consideraron constantes durante los años calculados. Por el uso de gas natural, los FE son: CO= 1,34E-06, NO_x= 3,76E-06, COVDM= 8,80E-08 y SO₂= 9,61E-09. Los FE por el uso de diésel, son: CO= 6,00E-04, NO_x= 2,44E-03, COVDM= 3,20E-05 y SO₂= 5,11E-04.

Dados los bajos FE de los GEI indirectos, atribuibles al uso de gas natural, las emisiones de la presente subcategoría no son importantes; con excepción de los NOx, que dependen en gran medida de las temperaturas de la combustión.

Tabla 2.12. Emisiones de GEI indirectos, por el uso de combustible en la producción de piso cerámico en San Luis Potosí.

Combustible	Unidades	2002	2003	2004	2005	2006
Gas natural	m ³	27 554 809	48 812 097	51 882 454	54 191 754	57 003 590
Emis CO	ton	37,034	65,603	69,730	72,834	76,613
Emis NOx	ton	44,088	78,099	83,012	86,707	91,206
Emis COVDM	ton	2,425	4,295	4,566	4,769	5,016
Emis SO ₂	ton	0,265	0,469	0,498	0,520	0,547
Diesel	m ³	125	147	157	164	172
Emis CO	ton	0,075	0,088	0,094	0,098	0,103
Emis NOx	ton	0,300	0,354	0,376	0,393	0,413
Emis COVDM	ton	0,004	0,005	0,005	0,005	0,006
Emis SO ₂	ton	0,064	0,075	0,080	0,084	0,088

2.4.4. Emisiones por la producción de asfalto: subcategoría 2A6

El pavimento de asfalto consiste en una mezcla de agregados, arena, rellenos, alquitrán y aditivos. En su proceso de fabricación, y durante las operaciones de revestimiento de las carreteras se generan emisiones de COVDM, que también se desprenden posteriormente de la superficie de la carretera (IPCC, 1996).

Estimación de las emisiones de COVDM.

Datos de actividad. De la información en las Cédulas de Operación Anual (COA) del 2005 y 2009, se identificaron seis empresas constructoras que dentro de sus operaciones incluyen la fabricación de concreto o carpeta asfáltica. Estas empresas declararon la cantidad de combustible utilizado, específicamente, en la máquina mezcladora utilizada en el proceso de producción del concreto asfáltico; sin embargo, no todas las empresas incluyeron su volumen de producción. Por lo

anterior, para estimar el volumen de producción de las empresas que omitieron dicha información, se realizó lo siguiente:

1. Primero, con la información de las empresas que declararon tanto la cantidad de combustible como de producción, se procedió a construir un modelo de regresión simple. Con un coeficiente de determinación del 95,2%, se concluyó que el modelo explica de manera suficiente la relación lineal entre las variables mencionadas (ver anexo 1).
2. Se utilizó el modelo para estimar las cantidades de concreto para aquellas empresas que si reportaron la cantidad de combustible, pero omitieron la del concreto.
3. Posteriormente, se utilizó como dato sustituto la TAV de la producción bruta nacional de productos de asfalto, calculada a partir de los datos de la encuesta industrial anual del INEGI, y se estimó la producción de concreto asfáltico para el resto de los años del inventario.

Factor de emisión. El FE utilizado para estimar las emisiones de COVDM (Tabla 2.13), es el propuesto en el manual de referencia del IPCC, que corresponde a 320 kilogramos de COVDM por cada tonelada de concreto asfáltico utilizado en la pavimentación de carreteras.

Tabla 2.13. COVDM generados en la producción de concreto asfáltico en San Luis Potosí.

Año	Concreto Asfáltico	Emisiones COVDM
	ton	kg
2000	226 933	72 618 546
2001	226 197	72 382 971
2002	260 908	83 490 622
2003	336 932	107 818 326
2004	420 534	134 570 806
2005	509 986	163 195 440
2006	611 596	195 710 603

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI en la producción de concreto asfáltico.

Los combustibles utilizados en las máquinas productoras de asfalto son el combustóleo y diésel. Al igual que para el cálculo de los COVDM, las cantidades de combustible se tomaron de las COA's proporcionadas por la SEGAM. De esta forma, se utilizaron los FE de los combustibles utilizados y se estimaron tanto las emisiones de CO₂e y de los GEI indirectos (Tablas 2.14 y 2.15).

Tabla 2.14. Toneladas de CO₂e emitidas por el uso de combustible en la producción de asfalto en San Luis Potosí.

Combustible	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
CBL (m³)	481	479	553	714	891	1 080	1 295
FE CO₂	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,01E+00	3,11E+00	2,93E+00	2,93E+00
Emis CO₂	1 496,31	1 491,46	1 720,33	2 151,05	2 771,11	3 166,43	3 797,31
FE CH₄	1,21E-04	1,21E-04	1,21E-04	1,17E-04	1,21E-04	1,14E-04	1,14E-04
Emis CH₄	0,06	0,06	0,07	0,08	0,11	0,12	0,15
FE N₂O	2,41E-05	2,41E-05	2,41E-05	2,34E-05	2,41E-05	2,27E-05	2,27E-05
Emis N₂O	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
CO₂e	1 501,12	1 496,26	1 725,87	2 157,97	2 780,02	3 176,62	3 809,53
Diesel (m³)	1 210	1 206	1 391	1 797	2 242	2 719	3 261
FE CO₂	2,67E+00	2,59E+00	2,59E+00	2,60E+00	2,68E+00	2,53E+00	2,53E+00
Emis CO₂	3 232,79	3 127,81	3 607,79	4 673,28	6 020,02	6 880,80	8 251,73
FE CH₄	1,08E-04	1,05E-04	1,05E-04	1,05E-04	1,09E-04	1,02E-04	1,02E-04
Emis CH₄	0,13	0,13	0,15	0,19	0,24	0,28	0,33
FE N₂O	2,16E-05	2,10E-05	2,10E-05	2,11E-05	2,17E-05	2,05E-05	2,05E-05
Emis N₂O	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Emis CO₂e	3 243,65	3 138,32	3 619,92	4 688,99	6 040,25	6 903,92	8 279,46

Tabla 2.15. Toneladas de GEI indirectos generados por el uso de combustible en la producción de asfalto en San Luis Potosí.

Combustible	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
CBL	481	479	553	714	891	1 080	1 295
Emis CO	0,29	0,29	0,33	0,43	0,53	0,65	0,78
Emis NOx	3,17	3,16	3,65	4,71	5,88	7,13	8,55
Emis COVDM	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11
Emis SO₂	34,41	34,29	39,56	51,08	63,76	77,32	92,73
Diesel	1 210	1 206	1 391	1 797	2 242	2 719	3 261
Emis CO	0,73	0,72	0,83	1,08	1,35	1,63	1,96
Emis NOx	2,90	2,89	3,34	4,31	5,38	6,53	7,83
Emis COVDM	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10
Emis SO₂	0,62	0,62	0,71	0,92	1,15	1,39	1,67

2.4.5. Emisiones en la fabricación de productos de vidrio: subcategoría 2A7

Se pueden distinguir diferentes tipos de vidrio: plano, para envases, lana de vidrio, especiales, así como vidrio para utensilios como vasos y vajillas. Indistintamente del tipo de vidrio del que se trate, el proceso productivo está basado prácticamente en cuatro pasos; a saber: mezcla de materias primas, fundición, formado o moldeado, y enfriamiento. Las emisiones atmosféricas se generan prácticamente en la fase de fundición, debido a la composición de las materias primas utilizadas: arena de sílice o desperdicios de vidrio, cenizas de sosa, caliza o feldespato, agentes colorantes o decolorantes (cromita férrica u óxido de hierro). Además de estas emisiones, se liberan las que se generan por el combustible utilizado para el horno (CONAMA, 1999).

El proceso de fundición es el paso más importante a considerar en la calidad y cantidad de vidrio a producir, el cual depende del diseño del horno. En los hornos de fundición, el vidrio es fundido a temperaturas entre 1 500 – 1 600 °C y es transformado a través de una secuencia de reacciones químicas. Los contaminantes emitidos durante la manufactura del vidrio son SO_x, NO_x, COVDM, CH₄, CO, CO₂ y N₂O. Se pueden generar otras emisiones no relevantes como cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno, partículas y metales pesados durante la fundición (INEGI, 2002).

De las bases de datos se identificaron dos grandes empresas pertenecientes a esta categoría, ubicadas en la ciudad de San Luis Potosí. Ambas fabrican envases de vidrio, de forma tal que esta semejanza sirvió para comparar las cantidades de materias primas y confrontar la información, dando lugar con esto al cumplimiento del control de calidad dentro del inventario.

Estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de productos de vidrio.

Datos de actividad. De la base DATGEN se obtuvo la cantidad de carbonato utilizada en la producción anual de cada empresa en cuestión. Tomando como referencia esa cantidad, se utilizó como dato sustituto la producción bruta nacional de este producto, tomada de las Estadísticas Históricas de México 2009 del INEGI, de manera tal que se estimaron las cantidades de carbonato para los demás años del inventario.

Factor de emisión. La acción de los carbonatos utilizados en la fusión del vidrio constituye una reacción química compleja a altas temperaturas y no debe compararse directamente con la calcinación de carbonatos para producir cal viva o cal de dolomita quemada. Sin embargo, esta fusión (en la región de los 1 500°C) tiene los mismos efectos netos desde el punto de vista de las emisiones de CO₂ (IPCC, 2006). Por lo anterior, el FE corresponde a la razón estequiométrica del carbonato utilizado; que en este caso es el carbonato de calcio, con un factor de 440 kg de CO₂ por tonelada de carbonato de calcio utilizado. Considerando este FE, se estimaron las emisiones de CO₂ en esta subcategoría (Tabla 2.16). Debido a que la estimación se calculó con la cantidad de carbonatos, se logró un nivel Tier 3.

Cálculo de la incertidumbre en la estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de productos de vidrio.

Datos de actividad. La incertidumbre calculada para los datos de actividad se obtuvo considerando el coeficiente de variación, calculado para cada empresa, finalizando con la obtención de una media ponderada de los mismos coeficientes,

resultando éste en un 12%. Aunque se conocían con certeza las cantidades de carbonato utilizado por las empresas en el año 2005, esta incertidumbre está calculada con base en las estimaciones que se realizaron para el resto de los años del inventario.

Tabla 2.16. Toneladas de CO₂ emitidas en la fabricación de productos de vidrio en San Luis Potosí.

Año	Carbonato de calcio	Emisiones CO ₂
2000	65 589	28 859
2001	65 504	32 555
2002	85 310	37 537
2003	74 346	32 712
2004	80 349	35 353
2005	83 983	36 953
2006	89 864	39 540

Factor de emisión. La incertidumbre del FE por el uso de carbonato de sodio depende, en gran parte, del proceso en el cual es utilizado; sin embargo, como la estimación de las emisiones se basó en las entradas de carbonatos, la incertidumbre del factor de emisión (1 a 3%) es relativamente baja pues éste depende del cociente estequiométrico (IPCC, 2006).

Estimación de emisiones de GEI indirectos en el PI del vidrio.

Puesto que el alcance del presente inventario incluye la estimación de las emisiones de GEI indirectos, se procedió a estimarlas tomando como referencia la Guía 11.15 Glass Manufacturing AP-42 de la EPA. La decisión de utilizar esta guía está basada en el hecho de que, aunque en las Directrices del IPCC 1996 se reconoce la existencia de tales emisiones, no se proporcionan FE asociados a cada tipo de emisión.

Datos de actividad. Para el año 2005 se conoce la cantidad anual de vidrio por cada empresa en cuestión. Tomando como referencia esa cantidad, se utilizó como

dato sustituto la TAV de la producción bruta nacional de este producto, tomada de las estadísticas históricas de México del INEGI (2009).

Factores de emisión. Los FE que se aplicaron para estimar los GEI indirectos generados en la transformación de las materias primas del proceso productivo de vidrio de las dos empresas ubicadas en el estado fueron tomados de la guía 11.15 Glass Manufacturing AP-42, la cual establece un FE para los NOx de 3,1 kg/ton vidrio y para los COVDM 0,1 kg/ton vidrio (Tabla 2.17).

Tabla 2.17. Emisiones de GEI indirectos generados en la fabricación de productos de vidrio en San Luis Potosí.

Año	Vidrio	NOx	COVDM
	ton	kg	kg
2000	373 993,56	1 159 380,03	37 399,36
2001	373 505,03	1 157 865,59	37 350,50
2002	466 810,25	1 447 111,79	46 681,03
2003	423 926,85	1 314 173,22	42 392,68
2004	458 153,30	1 420 275,24	45 815,33
2005	478 878,59	1 484 523,62	47 887,86
2006	512 409,67	1 588 469,96	51 240,97

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI de productos de vidrio.

El combustible utilizado en las dos empresas identificadas en San Luis Potosí (base DATGEN) es el gas natural, cuyos FE para los diferentes contaminantes criterio están en toneladas de contaminante por toneladas de vidrio producido: CO₂=2,22E-03, CH₄=3,96E-08 y N₂O=3,96E-09. Para la estimación del periodo completo del inventario, se utilizó como dato sustituto la TAV de la producción bruta nacional de vidrio (Tabla 2.18).

Para la estimación de las emisiones de los GEI indirectos por el uso de combustible, los FE utilizados fueron: CO=1,34E-06, NOx= 3,70E-06, COVDM= 1,39E-07 y

SO₂= 8,80E-08. Para estimar las emisiones del periodo completo (Tabla 2.19), se utilizaron los mismos datos sustitutos que en el cálculo anterior.

Tabla 2.18. Emisiones de CO₂e generadas por el uso de combustible en la fabricación de productos de vidrio en San Luis Potosí.

Año	Gas Natural	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ e
	m ³	ton	ton	ton	ton
2000	56 204 620	125 001	2,23	0,22	125 117
2001	56 131 203	124 837	2,23	0,22	124 953
2002	70 153 328	156 023	2,78	0,28	156 168
2003	63 708 710	141 690	2,53	0,25	141 821
2004	68 852 342	153 130	2,73	0,27	153 272
2005	71 966 985	160 057	2,85	0,29	160 205
2006	77 006 248	171 264	3,05	0,31	171 423

Tabla 2.19. Emisiones de GEI indirectos emitidos por el uso de combustible en la fabricación de productos de vidrio en San Luis Potosí.

Año	Ga Natural	CO	NO _x	COVDM	SO ₂
	m ³	kg	kg	kg	kg
2000	56 204 620	75 539	211 329	4 946	540
2001	56 131 203	75 440	211 053	4 940	539
2002	70 153 328	94 286	263 777	6 173	673
2003	63 708 710	85 625	239 545	5 606	612
2004	68 852 342	92 538	258 885	6 059	661
2005	71 966 985	96 724	270 596	6 333	691
2006	77 006 248	103 496	289 543	6 777	739

2.4.6. Emisiones en los procesos químicos: subcategoría 2B5

En el estado de San Luis Potosí se localizan varias empresas pertenecientes al giro de la industria química, sin embargo, ninguna de estas se ubica dentro de las subcategorías de la industria química, según la clasificación del IPCC; de tal manera que no se identificaron empresas clasificadas entre las subcategorías 2B1 hasta la 2B4. Sin embargo, se detectaron empresas que emiten CO₂ en sus procesos, y que

se pueden agregar en la subcategoría 2B5, referida en las Directrices como: otros procesos químicos.

En el estado se encuentran instaladas al menos doce empresas pertenecientes al giro de la producción de artículos de hule o plástico, tales como: telas plásticas, empaques plásticos, redes, neumáticos, entre otros. Dentro de las emisiones más significativas en este grupo se encuentran los COV; sin embargo, las Guías no proporcionan FE para estas emisiones en esta categoría de fuentes, por lo que se utilizaron los sugeridos por la US-EPA en el compendio AP-42. Por otra parte, se identificaron tres empresas cuyas actividades están dirigidas a la producción de resinas y/o productos plásticos y que, dentro de sus materias primas, se incluye el uso de carbonato de calcio, por lo que son fuentes de emisión de CO₂.

Estimación de emisiones de CO₂ en el PI de resinas, y productos de hule y plástico.

Datos de actividad. Las cantidades de carbonato de calcio que cada una de las empresas en cuestión utilizan se obtuvieron de las bases de datos de 1996 y 2005. Para conocer las cantidades de este carbonato para el resto de los años, se utilizó como dato sustituto la TAV de la producción bruta total de cada tipo de producto, cuyos datos se tomaron de las estadísticas históricas de México 2009, del INEGI.

Factor de emisión. El factor de emisión utilizado para la estimación de CO₂ (Tabla 2.20), es el sugerido por defecto en las Directrices, 440 kg de CO₂ por tonelada de piedra caliza utilizada.

Cálculo de la incertidumbre en la estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de resinas, y productos de hule y plástico.

Datos de actividad. La incertidumbre calculada para los DA se obtuvo con el coeficiente de variación calculado de las emisiones para cada empresa, con los cuales se obtuvo una media ponderada del 8,6%. Cabe señalar que, aunque se

conocían con certeza las cantidades de carbonato utilizado por las empresas, ya sea en el 1996 o 2005, esta incertidumbre está calculada en base a las estimaciones que se tuvieron que realizar para el resto de los años del inventario.

Factor de emisión. Debido a que la estimación de las emisiones se fundó en las entradas de carbonatos, la incertidumbre del FE (1% a 3%) es relativamente baja porque el FE depende directamente del coeficiente estequiométrico (IPCC, 2006).

Tabla 2.20. Toneladas de CO₂ emitidas en la producción de resinas y artículos de plástico, en San Luis Potosí.

Año	Carbonato calcio	Emisiones CO ₂
2000	3 407	1 499
2001	3 431	1 510
2002	3 459	1 522
2003	3 717	1 635
2004	5 077	2 234
2005	5 670	2 495
2006	5 677	2 498

Estimación de emisiones de COV en el PI de resinas, y productos de hule y plástico.

Datos de actividad. Dentro de esta categoría de fuentes de emisión se identificaron en la base DATGEN tres empresas con datos confiables para estimar sus emisiones de COV. Una de estas empresas se dedica a la fabricación de neumáticos por lo que, dada la naturaleza del proceso, la convierte en una fuente significativa de COV; la segunda empresa se dedica a la producción de resinas acrílicas y la tercera a resinas de PET (tereftalato de polietileno). En la base DATGEN se obtuvo la información sobre los volúmenes de producción de cada una de estas empresas. Se utilizaron datos sustitutos sobre la producción anual nacional de cada uno de estos productos, estimando retro y prospectivamente los volúmenes de producción para el resto del inventario.

Factor de emisión. En las directrices del IPCC no proporcionan FE para las emisiones de COV de los productos en cuestión, por lo que las fuentes para los FE utilizados en la fabricación de resinas fueron: 6.6.2 Poly(ethylene Terephthalate)¹⁻² y SCC 3-01-018-22 para resinas acrílicas en general, tomadas de la AP-42; para la producción de neumáticos se obtuvieron los FE utilizados y proporcionados por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA-DF) (Tabla 2.21).

Tabla 2.21. Factores de Emisión y emisiones de COV (kg) en la producción de resinas y productos plásticos

			Año	Emisiones COV
			2000	891 291,96
			2001	725 202,87
			2002	455 125,62
			2003	562 443,36
			2004	697 701,51
			2005	764 860,65
			2006	718 084,46

Producto	Factor de Emisión	
	Unidades	Valor
Resina acrílica	Kg COV/ton resina	3,90
PET	kg COV/ton resina	0,73
Neumáticos	kg COV/1000 llantas	*187,05

* El FE solo cubre las actividades del proceso en las que las emisiones están dadas por cada 1000 llantas. No se incluyeron los FE relacionados con la cantidad de solventes utilizados en el proceso.

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI en la producción de resinas, y productos de hule y plástico.

Las empresas identificadas dentro de la presente subcategoría de fuente utilizan diversos combustibles en la elaboración de sus productos. Para estimar las emisiones de CO₂e se aplicaron los FE correspondientes. De los combustibles usados por este sector industrial, el combustóleo es el más requerido, y dado su FE (2,93 ton CO₂/m³ de combustóleo), es el que más contribuye en las emisiones de CO₂e en esta subcategoría, al participar con el 86,67% del total de estas emisiones (Tabla 2.22).

De igual forma, para estimar las emisiones de los GEI indirectos, generadas por el uso de combustible en los distintos procesos productivos de la subcategoría de

productos químicos, se aplicaron los FE correspondientes a cada uno de los combustibles utilizados (Tabla 2.23).

Tabla 2.22. Toneladas de CO₂e emitidas, según el tipo de combustible usado en la producción de productos químicos (textiles, polímeros, aceites) en San Luis Potosí.

Año	Combustóleo	Diesel	Gas Natural	Gas LP
2000	60 158	2 483	4 014	664
2001	53 892	2 416	3 943	630
2002	47 165	2 431	3 937	620
2003	53 751	2 615	4 643	673
2004	66 700	3 635	6 443	755
2005	71 819	3 809	7 674	792
2006	69 912	4 156	7 935	817

Tabla 2.23. Emisiones de contaminantes criterio generadas por el uso de combustible en la elaboración de productos químicos en San Luis Potosí.

Año	CO	NO _x	COV	SO ₂
2000	14 936	136 857	2 986	1 379 320
2001	13 690	123 463	2 694	1 235 691
2002	12 392	109 243	2 386	1 081 510
2003	14 487	128 282	2 801	1 272 929
2004	17 990	155 970	3 404	1 530 442
2005	20 683	178 594	3 898	1 748 908
2006	20 549	175 110	3 822	1 702 554

2.4.7. Emisiones en la producción de hierro y acero: subcategoría 2C1

Las Directrices del IPCC incluyen dentro de esta categoría a los procesos de producción de fierro y acero, ferroaleaciones y de aluminio; sin embargo, en el estado de San Luis Potosí se detectaron empresas productoras de otros metales que no se incluyen en la clasificación de las Directrices, pero que también son fuentes de emisión de GEI. Por esto, se determinó incluir también a estas últimas empresas, con el objetivo de que la categoría de producción de metales refleje de una manera más completa las emisiones derivadas de este tipo de empresas.

Por lo anterior, de manera interna y para facilitar el cálculo de las emisiones, se crearon los siguientes grupos para esta categoría: producción de hierro y acero, producción de cobre; así como la producción de plomo (proceso de recuperación). Para dar continuidad a la clasificación sugerida por las Directrices, todas las emisiones de GEI generadas por estos giros industriales se unificaron en la subcategoría 2C1.

El acero se produce en un proceso de dos fases (figura 2.12). En la primera, el mineral de hierro es reducido o fundido con coque y piedra caliza, produciendo hierro fundido que es moldeado como arrabio o conducido a la siguiente fase como hierro fundido.

La segunda fase, llamada acería, tiene por objetivo reducir el alto contenido de carbono introducido al fundir el mineral y eliminar las impurezas tales como azufre y fósforo; al mismo tiempo, algunos elementos como el manganeso, níquel, cromo o vanadio se añaden en forma de ferro-aleaciones para producir el tipo de acero requerido (SE, 2011). Algunas empresas cuentan con instalaciones integradas en las cuales se realizan las dos fases anteriores, pero existen otras en las que únicamente lleva a cabo la segunda fase, conocida como producción secundaria de acero.

La Producción de acero en México y San Luis Potosí

Con una participación que lo coloca entre los primeros ocho estados de mayor producción de acero a nivel nacional, San Luis Potosí refleja la importancia de la industria siderúrgica dentro del ámbito manufacturero en el estado. Las dinámicas de la producción nacional y estatal de acero entre 1996-2010 presentaron, en la mayoría del periodo, una pauta similar caracterizada por un crecimiento del sector, con excepción de los años afectados por crisis económicas, como el 2001 y 2008 (Gráfica 2.7).

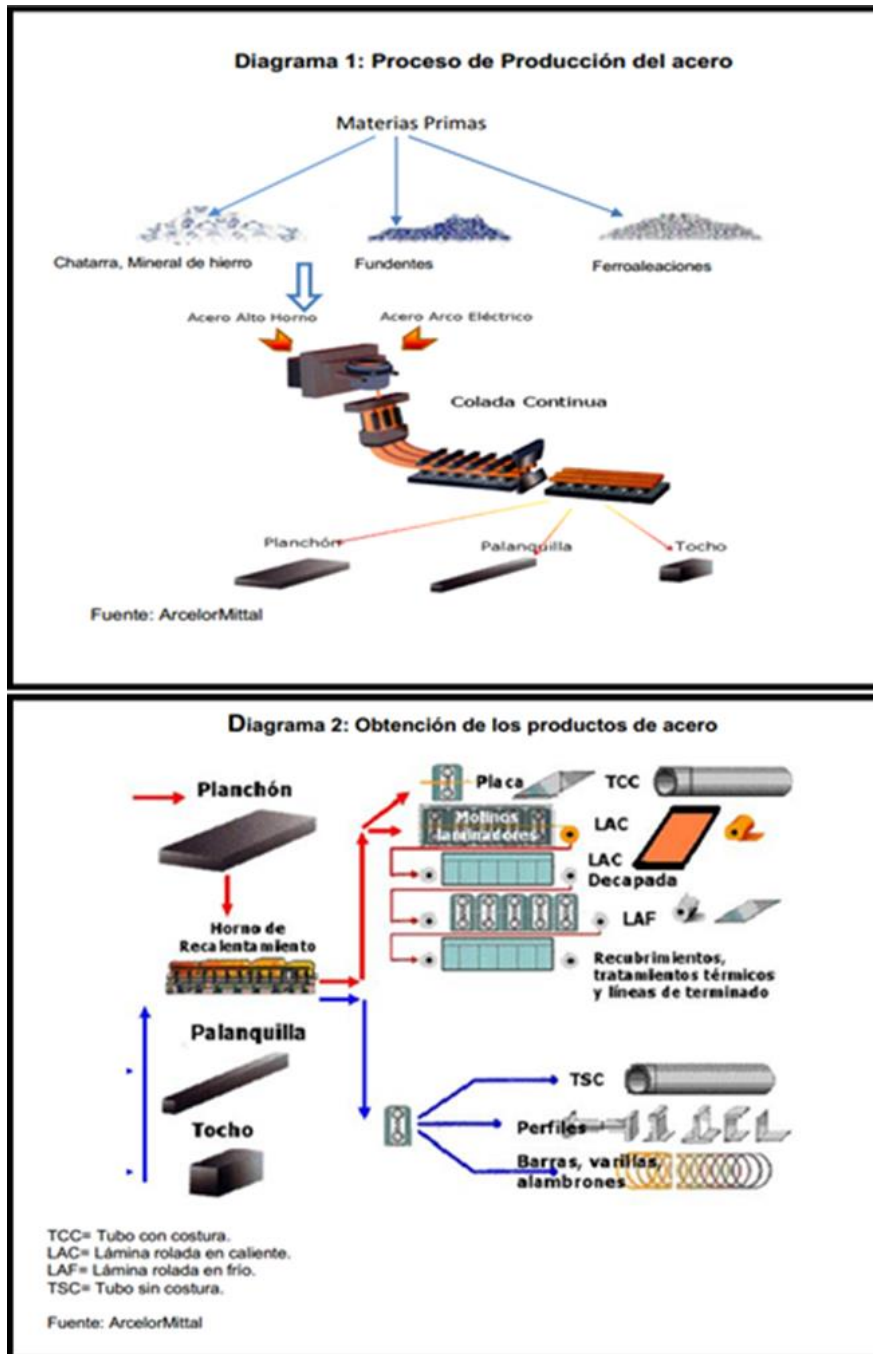
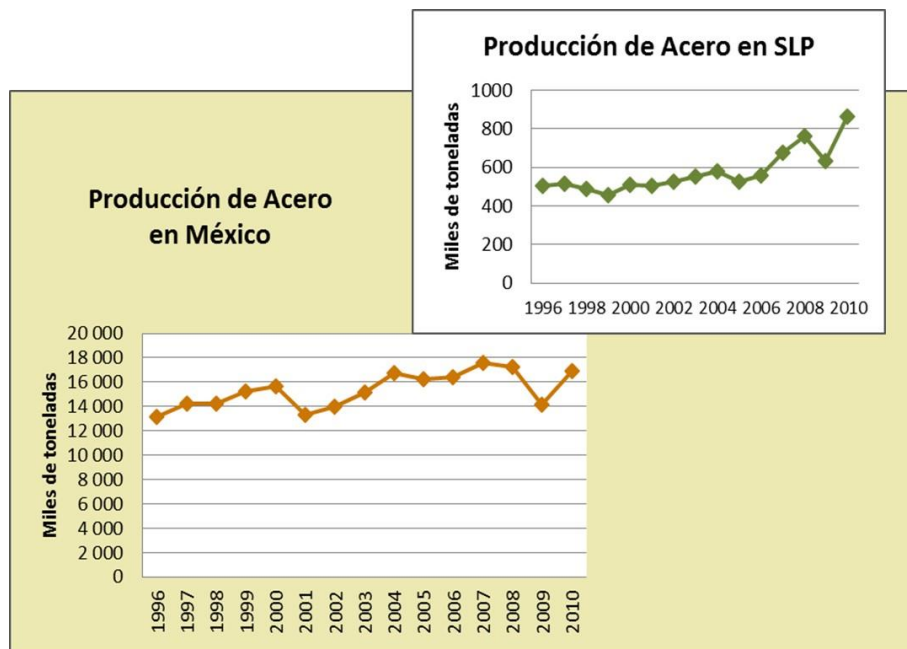


Figura 2.12. Flujo y materias primas utilizadas en la producción de acero. Fuente: SE, tomada de ArcelorMittal (2012).



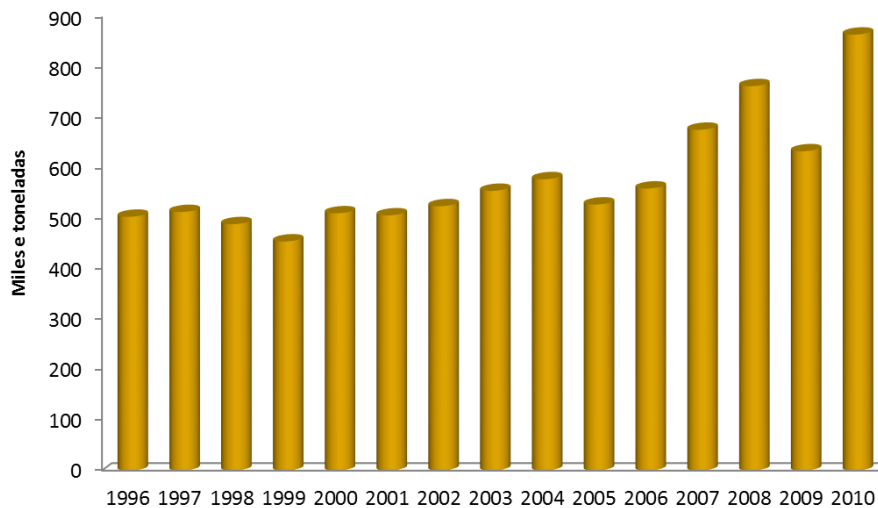
Gráfica 2.7. Dinámica de la producción anual de acero en México y San Luis Potosí. Elaboración propia con datos de INEGI.

Dentro de los productos de acero más destacados en el estado, por su volumen, se encuentran la producción de alambazón, varilla corrugada y laminados. En términos generales, el volumen del acero producido en los últimos doce años ha presentado una tendencia ascendente (Gráfica 2.8). La contribución de San Luis Potosí en la producción nacional de acero es en promedio del 3,8% anual, colocándose por ello entre el sexto u octavo lugar. Sin embargo, en las ventas anuales de varilla corrugada ha conservado el primer lugar en los últimos diez años, llegando a un volumen de ventas de 453 271 toneladas en el 2010 (INEGI, 2000, 2008 y 2001).

Estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de hierro y acero.

La mayor parte del CO₂ emitido por la industria del hierro y del acero está asociado con la producción de hierro, específicamente, con el uso del carbón o coque como agente reductor para convertir el mineral de hierro en hierro metálico. Además, se producen emisiones cuando el fundente de caliza o dolomita desprende CO₂ durante la reducción del arrabio en el alto horno. Excepto por una pequeña cantidad

de carbono retenida en el hierro bruto, todo el carbono del coque y de los fundentes se emite como producto de la combustión y la calcinación.



Gráfica 2.8. Volumen (toneladas) anual de producción de acero en san Luis Potosí. Elaboración propia, con datos de la industria siderúrgica en México del NEGI (2000, 2008 y 2011).

Durante la producción de acero se desprenden emisiones en mucho menor grado, que es esencialmente el proceso de eliminación (generalmente por oxidación) de la mayor parte del carbono contenido en el hierro bruto (IPCC: GBP, 2000); pero deben considerarse también las emisiones adicionales por el consumo de electrodos cuando se produce el acero en hornos de arco eléctrico.

Datos de actividad. Como se explicó en la introducción de esta categoría, la industria siderúrgica en San Luis Potosí es de notable importancia, por lo que se identificaron varias empresas, sobre todo dedicadas a la producción de varilla y alambón, en las que se realiza el proceso de forma integral; sin embargo, una gran parte de las empresas dedicadas a este giro no realizan el proceso de fundición, ya que se enfocan a los productos laminados, ya sea en frío o caliente.

En la base de DATGEN se identificaron las cantidades del agente reductor utilizado por algunas empresas durante el 2005; y para las que no lo reportaron, se estimaron las cantidades por interpolación, tomando como comparación su volumen de producción. Por otra parte, se estimaron las cantidades del agente reductor para el resto de los años del inventario, tomando como dato sustituto la TAV de la producción de hierro y acero en San Luis Potosí, calculada a partir de las estadísticas de la industria siderúrgica en México del INEGI.

Factor de emisión. Las Directrices proporcionan diferentes FE para estimar las emisiones de esta categoría de fuentes de emisión; la diferencia estriba en los DA que se obtengan de las diversas fuentes de información. La diferencia consiste, básicamente, en disponer del volumen de acero producido o un DA más puntual como la cantidad del agente reductor utilizado en el proceso. Como puede deducirse, la metodología más precisa para estimar las emisiones de CO₂, es conocer la cantidad del agente reductor utilizado en el proceso, en este caso puede ser el carbón o coque.

Para llevar a cabo la estimación se utilizaron los FE por defecto de la Directrices, que sugieren 3,6 toneladas de CO₂ por tonelada de coque, que es el agente reductor utilizado en este proceso (Tabla 2.24).

Cálculo de la incertidumbre en la estimación de las emisiones de CO₂ en el PI de hierro y acero.

Datos de actividad. En la guía GBP, se propone una incertidumbre entre el 5% y 10% para los datos de actividad estimados por interpolaciones, y tomados de sistemas de datos menos avanzados. Por lo que en este caso se tomó un 7% de incertidumbre.

Factor de emisión. De acuerdo a la guía GBP, en su sección 2.1.1.6, la incertidumbre asociada en los factores de emisión para el agente reductor (carbón

o coque) suelen estar dentro del 5%, por lo que se tomó como término medio un 3%.

Tabla 2.24. Emisiones de CO₂ en la producción de acero en San Luis Potosí.

Año	Coque	Emisiones CO ₂
2000	15 655	56 359
2001	15 528	55 900
2002	16 087	57 914
2003	17 021	61 276
2004	17 729	63 823
2005	83 983	58 272
2006	89 864	61 791

Estimación de emisiones de GEI indirectos en el PI de hierro y acero.

En las diferentes etapas del proceso de hierro y acero se liberan diversas emisiones; sin embargo, también durante los procesos de obtención de los productos de acero, como los laminados en frío, ocurren diferentes emisiones, entre las que se incluyen las de gases de efecto invernadero indirecto: NO_x, COVDM, CO y SO₂.

Datos de actividad. Dentro de la actividad de laminados en frío se detectaron al menos siete empresas instaladas en el estado. Para la mayoría de éstas se conocía el volumen de producción en toneladas de acero del 2005; sin embargo, para otras empresas se identificaron datos de producción en los sitios web pertenecientes a las mismas. Finalmente, para estimar las toneladas de acero producido en el resto de los años del inventario, se utilizó el mismo dato sustituto que en la estimación de las emisiones de CO₂.

Factor de emisión. Se utilizaron los factores por defecto, proporcionados en las Directrices, cuyos valores son: SO₂=0,045, NO_x=0,040, CO=0,001, COVDM=0,030. Estos FE están dados en kilogramo de gas por tonelada de acero producido.

Finalmente, con los DA y estos FE se estimaron las emisiones en la producción de laminados en frío (Tabla 2.25).

Tabla 2.25. Gases de efecto invernadero indirecto emitidos en la producción de laminados de acero en frío en San Luis Potosí.

Año	Acero	SO ₂	NO _x	COVDM	CO
	ton	kg	kg	kg	kg
2000	261 399	11 763	10 456	7 842	261
2001	259 270	11 667	10 371	7 778	259
2002	268 613	12 088	10 745	8 058	269
2003	284 206	12 789	11 368	8 526	284
2004	296 017	13 321	11 841	8 881	296
2005	270 270	12 162	10 811	8 108	270
2006	286 588	12 896	11 464	8 598	287

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI en la producción de hierro y acero.

De las bases de datos, se adquirieron los consumos de combustibles de las empresas incluidas en la presente subcategoría. Para los años en los que dichos consumos se desconocían, se estimaron utilizando la TAV de la producción de hierro y acero en San Luis Potosí, obtenida de las estadísticas de la Industria siderúrgica en México del INEGI. Las emisiones de CO₂e y los GEI indirectos se estimaron con los FE correspondientes a cada tipo de combustible (Tablas 2.26 y 2.27).

Tabla 2.26. Toneladas de CO₂e emitidas por el uso de combustible en la producción de metales en San Luis Potosí.

Año	Combustóleo	Diesel	Gas Natural	Gas LP
2000	15 298	725	143 742	1 100 796
2001	15 174	698	142 571	1 091 830
2002	15 721	723	147 709	1 131 175
2003	16 105	767	156 283	1 221 842
2004	17 314	825	162 778	1 272 616
2005	14 895	710	148 620	1 148 871
2006	15 794	752	157 593	1 216 893

De la matriz de combustibles utilizados en esta categoría de fuentes, el uso de gas natural tiene una demanda importante, con una participación del 98% del volumen total de esta categoría; sin embargo, debido a los bajos FE para los diferentes gases emitidos con este combustible, su contribución en las emisiones de GEI no lo convierten en el mayor emisor.

Tabla 2.27. Kilogramos de GEI indirectos generados por el uso de combustible en la producción de metales en San Luis Potosí.

Año	CO	NOx	COV	SO ₂
2 000	789 522	1 504 134	71 594	354 145
2 001	783 092	1 491 883	71 011	351 260
2 002	811 311	1 545 644	73 570	363 918
2 003	858 408	1 635 370	77 841	385 044
2 004	894 083	1 703 335	81 076	401 046
2 005	816 316	1 555 179	74 024	366 163
2 006	865 604	1 649 079	78 494	388 272

2.4.8. Emisiones en la producción de pulpa y papel: subcategoría 2D1

Se detectaron tres empresas dedicadas a la fabricación de papel para distintos propósitos: papel higiénico, periódico, y para impresión, pero ninguna de éstas incluye en su proceso la fabricación de la pulpa, que es la fase en la que se liberan la mayoría de las emisiones al aire. De hecho, la más grande de estas empresas, es reconocida a nivel nacional por su capacidad en la producción de papel; sin embargo, dentro de su proceso utiliza, principalmente, fibra reciclada.

Por otra parte, también se identificaron varias empresas dedicadas a la impresión o plastificación de diferentes tipos de papel: papel metalizado, bolsas de papel, empaques laminados, entre otros.

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI en la producción y uso de papel.

Aunque las empresas de esta subcategoría no contribuyen en las emisiones de GEI dentro de sus procesos, si se incluyeron en esta categoría de fuente por las emisiones que generan por el uso de combustibles.

De la base de DATGEN y de la encuesta de 1996, se obtuvieron las cantidades de combustible de las empresas de esta subcategoría. Para estimar el combustible consumido en el resto de los años, se utilizó la TAV de la producción nacional para cada uno de los productos elaborados, tomados de la encuesta industrial mensual del INEGI.

Aunque la mayoría de las empresas que hacen uso de papel para elaborar sus productos consumen grandes cantidades de gas natural, las empresas dedicadas a la fabricación de papel utilizan aún el combustóleo, y como es uno de los combustibles fósiles más contribuyentes en las emisiones de CO₂, es el de mayor participación en las emisiones de GEI de esta subcategoría (Tabla 2.28).

Tabla 2.28. Emisiones de GEI por el uso de combustibles en la producción y uso de papel en San Luis Potosí.

Año	Combustóleo	Gas natural	CO	NOx	COVDM	SO₂
	ton CO ₂ e	ton CO ₂ e	kg	kg	kg	kg
2000	153 969	18 011	40 450	355 755	7 761	3 529 059
2001	148 841	17 411	39 102	343 905	7 502	3 411 513
2002	153 061	17 904	40 211	353 656	7 715	3 508 244
2003	153 063	18 492	41 530	365 260	7 968	3 623 355
2004	165 345	19 353	43 466	382 279	8 340	3 792 182
2005	161 205	20 026	44 975	395 555	8 629	3 923 876
2006	164 352	20 416	45 853	403 277	8 798	4 000 477

2.4.9. Emisiones en la producción de alimentos y bebidas: subcategoría 2D2.

En términos de derrama económica y número de empleos, la industria alimentaria de San Luis Potosí tiene gran importancia en el estado. Proporciona 21 058 empleos

en sus 2 722 unidades económicas, y aporta el 14,9% de la producción bruta total de la industria manufacturera en el estado. Las ramas que tienen mayor participación en la producción de alimentos, por su personal ocupado, son: elaboración de productos de panadería y tortillas, y la elaboración de azúcares, chocolates, dulces y similares (SEDECO, 2012).

Dada la naturaleza de las materias primas utilizadas en la producción de alimentos, las emisiones importantes que se generan, exclusivamente en el proceso de esta subcategoría, son los COVDM. Sin embargo, los gases emitidos en los equipos de combustión, son la mayor fuente de contribución de GEI.

Estimación de emisiones de COVDM en el PI de Alimentos y Bebidas.

La producción de bebidas alcohólicas, la panificación y la elaboración de otros alimentos, generan emisiones de COVDM. La estimación de las emisiones se basa en la producción total anual y depende, en gran medida, del tipo de alimento.

Datos de actividad. Aunque existen un gran número de empresas pertenecientes a la industria alimentaria en el estado, solo un número reducido de estas quedan incluidas en la presente subcategoría, debido a que, por la naturaleza de sus materias primas, no todas generan emisiones de COVDM. Las empresas que se identificaron como emisoras de estos compuestos fueron: las productoras de azúcar, las panificadoras, las productoras de grasas y aceites, y de alimentos (pienso) para animales.

De manera específica, los datos de actividad para las industrias productoras de azúcar fueron tomados de los informes de la Unión Nacional de Cañeros, A.C., en los cuales se incluye la producción de azúcar para cada uno de los años considerados en el inventario.

Para los datos de la panificadora, solo se contaba con los datos relativos al consumo de combustible y materia primas del año 2005. Se estimaron los datos relativos a la cantidad de su producción por comparación con los datos de otra empresa de la misma compañía, que elabora la misma variedad de productos, pero ubicadas en otro estado. Finalmente, se utilizó como dato sustituto el volumen de pan producido a nivel nacional, para estimar la producción de la empresa para el resto de los años del inventario.

Los datos relativos a la producción de las empresas que elaboran grasas y aceites comestibles, así como los de alimentos para animales, se tomaron de las bases 1996 y 2005, y se utilizó el dato sustituto de la producción anual nacional de cada uno de estos productos para estimar el resto de los años inventariados.

Factores de emisión. Para la estimación de las emisiones de COVDM de las empresas identificadas en esta subcategoría de fuentes, los FE utilizados son los sugeridos por defecto en las Directrices. Finalmente, al contar con el volumen anual de producción de cada uno de los productos antes mencionados, y sus respectivos FE (Tabla 2.29), se realizaron las estimaciones de COVDM correspondientes (Tabla 2.30).

Tabla 2.29. Factores de Emisión (kg COVDM/ton producto) y datos de actividad (toneladas) utilizados para la estimación de las emisiones de COVDM.

Producto	FE	Año	Azúcar	Grasas	Pan	Pienso
		2000	441 601	15 153	24 970	9 240
		2001	385 116	16 060	27 747	9 829
		2002	466 901	15 010	30 290	9 886
		2003	556 247	14 630	33 403	9 670
		2004	387 704	14 588	37 799	9 246
		2005	400 100	14 316	43 127	9 684
		2006	453 536	14 318	45 938	9 958

La producción de azúcar es una actividad de gran importancia en el sector alimentario del estado. Actualmente, de manera oficial, se localizan cuatro ingenios

azucareros, cuyo volumen total de azúcar es de tal magnitud que lo convierten en la fuente principal de emisión de COVDM del sector alimentario estatal.

Tabla 2.30. Kilogramos de COVDM emitidos durante la producción de alimentos, en San Luis Potosí.

Año	Azúcar	Grasas	Pan	Pienso
2000	4 416 007	151 534	199 759	9 240
2001	3 851 160	160 600	221 977	9 829
2002	4 669 010	150 104	242 322	9 886
2003	5 562 470	146 302	267 225	9 670
2004	3 877 040	145 875	302 393	9 246
2005	4 001 000	143 158	345 018	9 684
2006	4 535 360	143 178	367 505	9 958

Estimación de las emisiones de GEI por el UCPI en la producción y alimentos y bebidas.

La matriz de los combustibles utilizados en esta subcategoría de fuentes es diversa: combustóleo, diésel, GLP, gas natural y bagazo de caña. Las cantidades utilizadas por las diferentes empresas se adquirieron de las bases de datos mencionadas anteriormente. Para los casos en los que no se contó con información completa para el periodo, se estimó el combustible utilizando la TAV de la producción nacional anual del producto correspondiente. Las emisiones de CO₂e y de los GEI indirectos, se calcularon con los FE correspondiente a cada tipo de combustible (Tablas 2.31 y 2.32). Las emisiones generadas por el uso de bagazo de caña se estimaron con los FE propuestos en la compilación AP-42, según la clasificación SCC 1-02-011-01.

El gas natural es el principal combustible dentro de la matriz energética de la presente subcategoría, con una demanda anual media de 7 473 060 metros cúbicos. Por otro lado, el uso del bagazo de caña como biocombustible sólido tiene una participación importante como fuente de energía en la producción de azúcar, con un volumen medio anual de 1 248 570 toneladas; que por el FE del CO₂ que se le

atribuye, 0,705 tCO₂/t de bagazo, se le distingue como el combustible más emisor de este gas dentro de la presente subcategoría.

Tabla 2.31. Toneladas de CO₂e emitidas por el uso de combustible en la producción de alimentos y bebidas en San Luis Potosí.

Año	Combustóleo	Diesel	Gas Natural	Gas LP	Bagazo caña
2000	78 377	1 874	11 475	40	784 252
2001	104 085	1 966	12 456	43	837 614
2002	83 694	2 309	14 253	49	878 840
2003	132 485	2 720	16 213	57	877 892
2004	164 748	3 270	18 360	65	859 158
2005	127 834	3 567	20 571	72	1 147 783
2006	113 305	4 106	23 122	81	895 841

Tabla 2.32. Kilogramos de GEI indirectos emitidos por el uso de combustible en la producción de alimentos y bebidas en San Luis Potosí.

Año	CO	NOx	COVDM	SO ₂
2000	22 428	806 986	4 072	1 796 810
2001	27 994	905 769	5 290	2 386 066
2002	25 246	901 423	4 433	1 918 785
2003	36 733	1 021 223	6 950	3 136 770
2004	43 519	1 075 278	8 325	3 779 088
2005	39 385	1 241 759	7 088	3 112 342
2006	38 095	1 029 227	6 492	2 758 821

2.5 Conclusiones

Durante el periodo 2000-2006, las emisiones totales de CO₂e de los procesos industriales, generadas tanto por la transformación de las materias primas utilizadas en los diferentes procesos descritos anteriormente, así como por el uso de combustibles como fuentes de energía, resultaron en 39 985 755 toneladas. De estas emisiones, 12 875 382 que corresponde con el 30%, fueron liberadas, principalmente, por el uso de carbonatos como materias primas en los procesos, que son las emisiones pertenecientes al grupo de PI; mientras que las restantes

27 110 373 toneladas, fueron producto de la quema de los diferentes combustibles utilizados en los procesos de este sector; es decir, las emisiones del grupo UCPI.

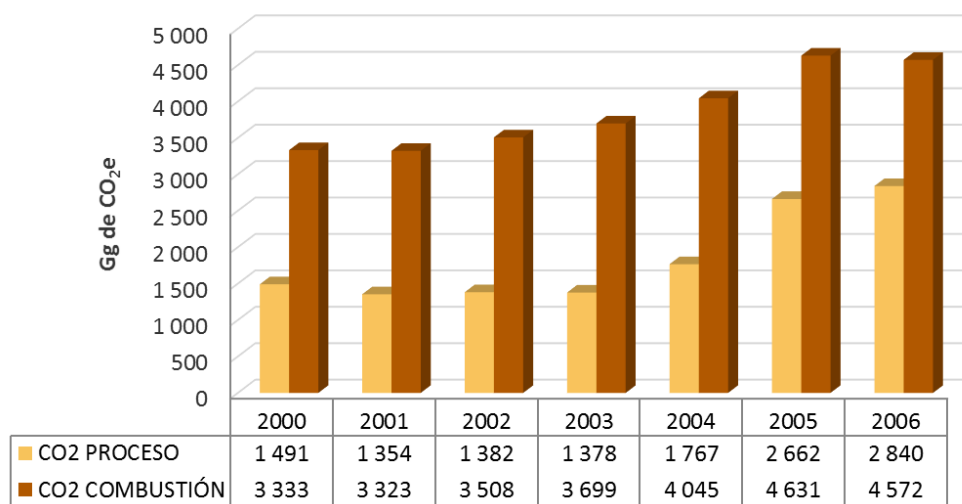
Por otra parte, si bien es cierto que la tendencia en las emisiones por estos dos grupos de emisiones (PI y UCPI) parecen similares durante cierta parte del periodo de estudio (2001-2003), vale la pena analizar y destacar algunas diferencias que se observan (Gráfica 2.9). Del 2000 al 2001 la TAV de las emisiones de GEI de estos grupos fue distinta; mientras que para el grupo de PI la TAV fue del - 9%, para el de UCPI fue solo del - 1%. En el 2001 se experimentó una crisis económica, en la que la TAV del PIB nacional entre el 2000-2001 fue - 0,17%; sin embargo, la TAV del PIB estatal fue de 1,68% (INEGI, 2001, 2005, 2009, 2012).

La gran mayoría de los sectores productivos en el estado manifestaron entre el 2000-2001 una disminución en su PIB, como consecuencia de la situación nacional e internacional que prevalecía; sin embargo, el sector alimentario fue una de las excepciones, al presentar una TAV del 10.4% en su PIB (INEGI, 2005, 2009). Por esto, la disminución en las emisiones de CO₂e es más marcado dentro del grupo de PI, con una TAV del -9% ya que la producción de minerales no metálicos: cemento y cal (principales emisores de CO₂ en PI), de acero y productos metálicos entre otros, disminuyó en este periodo; sin embargo, el sector alimentario estatal siguió incrementando su PIB y con ello el volumen de combustibles utilizados en sus procesos, razón por la cual la TAV del grupo de emisiones por el UCPI fue solo del -1%.

Otra diferencia importante es la observada en el 2003-2004, donde la TAV de las emisiones de los grupos en cuestión fue distinta: el grupo de emisiones de PI experimentó una TAV del 28%, mientras que el de UCPI fue solo del 9%. Esta diferencia se explica por la apertura de dos empresas en cuyos procesos hacen uso de cantidades importantes de piedra caliza; material que durante su calcinación genera emisiones importantes de CO₂.

La TAV de las emisiones de GEI para el periodo 2004-2005 fue del 50% para el grupo de PI, y del 15% para el UCPI; lo cual se justifica por la misma apertura de las empresas ya mencionadas; aunado al hecho de que una de estas empresas inició operaciones en una segunda línea de producción, razón por la cual sus emisiones en el 2005 fueron casi el doble del año previo.

Por otra parte, del 2005-2006 la TAV de los grupos de emisiones están por completo en diferentes direcciones, mientras que el grupo de UCPI presentó una TAV del - 2%, para el grupo de PI fue del 7%. El motivo en la disminución de las emisiones en el UCPI se debió, en gran parte, a la subcategoría de alimentos y bebidas, que presentó una TAV del - 20%.

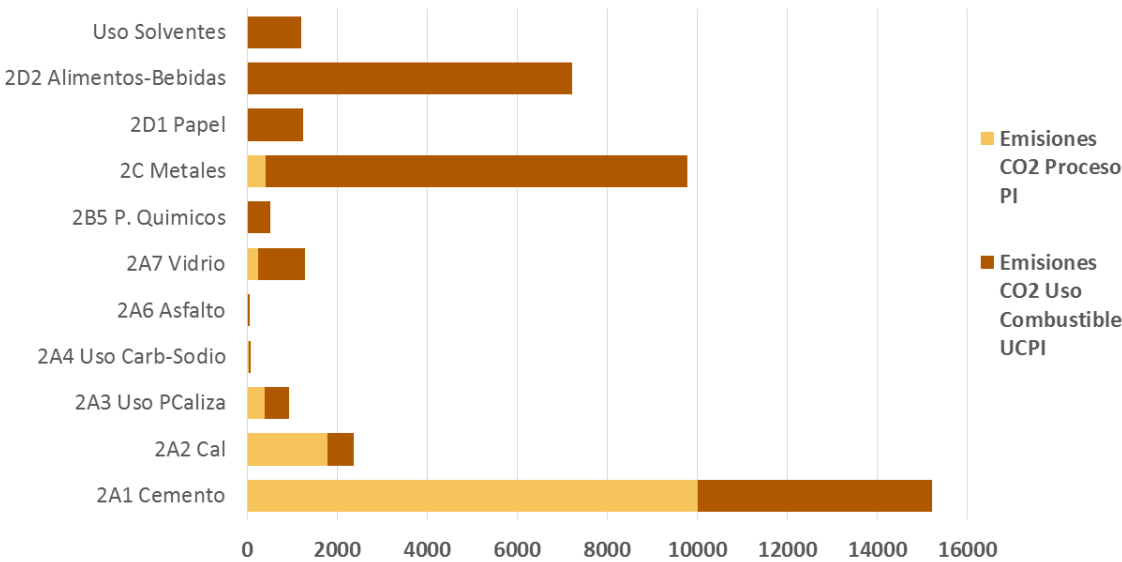


Gráfica 2.9. Emisiones anuales (Gigagramos, Gg), de CO₂e por grupo: emisiones por PI (amarillo) y por UCPI (café).

Es importante destacar la diferencia dentro de las mismas categorías de fuentes de emisión más contribuyentes. Por ejemplo, la subcategoría más contribuyente en la totalidad de las emisiones de GEI del sector industrial, con una participación del 38%, es la subcategoría 2A1: producción de cemento; sin embargo, es importante destacar que su principal fuente de CO₂ la constituye su proceso (PI), cuyas emisiones representan el 66% de su totalidad, mientras que estas mismas por el

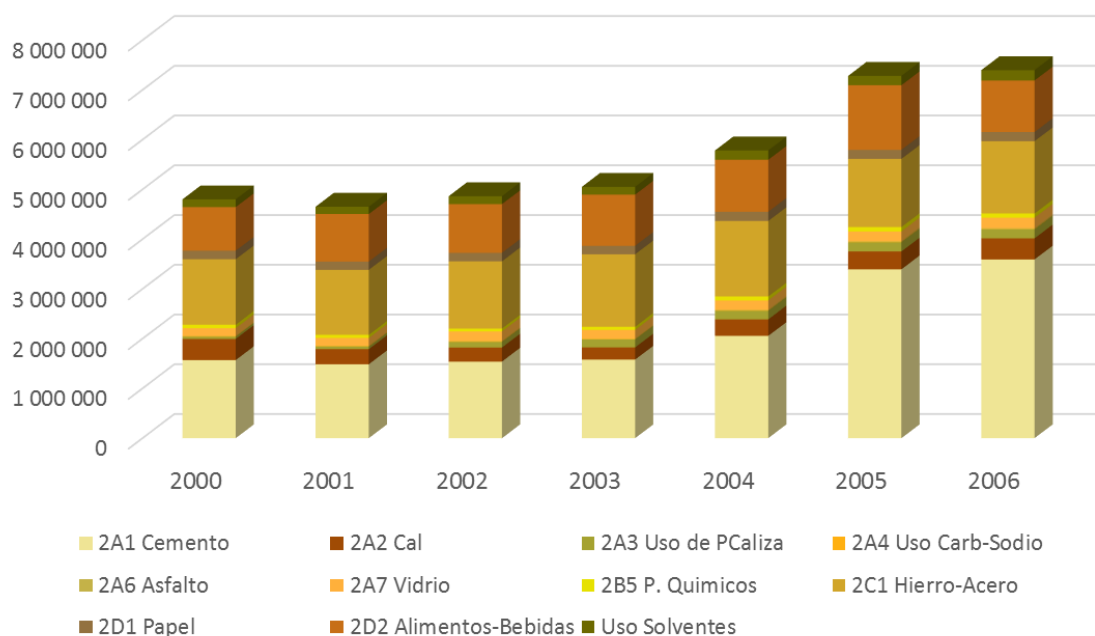
uso de combustible (UCPI) son el restante 34% (Gráfica 2.10). Es importante destacar lo anterior, ya que la propuesta de reducción de emisiones debe estar dirigida hacia las fuentes específicas de mayor emisión de GEI.

Por otro lado, para la segunda y tercer subcategorías más contribuyentes en las emisiones de GEI, 2C1: producción de hierro y acero, y la 2D2: alimentos y bebidas, su principal fuente de emisión está basada en la cantidad y tipo de combustibles utilizados como fuentes de energía en sus procesos.



Gráfica 2.10. Emisiones de CO₂e (Gg) generadas en: procesos industriales PI (color claro) y por el uso de combustibles en los procesos industriales UCPI (color oscuro) en cada subcategoría de fuente de emisión.

Es importante analizar las emisiones de GEI de cada una de las categorías de fuente a través del tiempo (Gráfica 2.11); algunas de estas pueden variar de un año a otro, cambiando la tendencia en sus emisiones o en los valores absolutos de las mismas. Esta información puede ser de gran utilidad para proyectar la totalidad de GEI del sector o para la construcción de los posibles escenarios de emisiones.



Gráfica 2.11. Toneladas anuales de CO2e de cada subcategoría incluida en el sector de Procesos Industriales.

Por otra parte, es importante conocer las emisiones de los GEI indirectos, ya que algunos de estos, como el CO, COVDM y NO₂ contribuyen en la formación del O₃, que es otro GEI de importancia en la problemática del calentamiento global (Tabla 2.33). Por otro lado, el CO, SO₂ y NO₂ son catalogados como contaminantes criterio y afectan, en una escala local, al bienestar de la población y el medio ambiente.

La mayoría de las emisiones está relacionada con la matriz de combustibles utilizados en las diferentes subcategorías de fuentes de emisión. Por ejemplo, el mayor contribuyente de CO, con una participación del 66% en estas emisiones, es la subcategoría de hierro y acero, debido a que algunas empresas de este giro aún utilizan gas LP, que tiene un elevado FE de CO. De igual forma, el FE de SO₂ del coque de petróleo es también alto en comparación con el resto de los combustibles, debido a que el coque contiene hasta un 6% de azufre; por esta razón, el mayor contribuyente con una participación del 68% en estas emisiones es la subcategoría

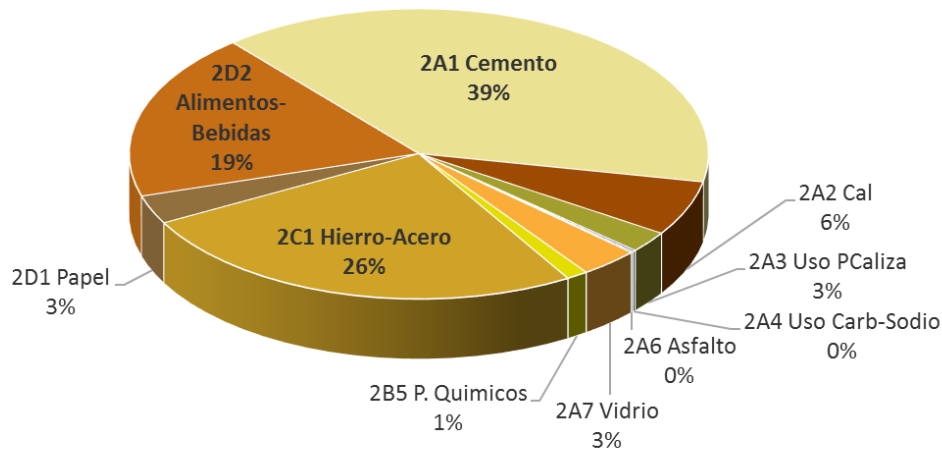
de cemento, que utiliza el combustible en cuestión como fuente de energía térmica para los hornos.

Tabla 2.33. Kilogramos de GEI indirectos, emitidos por el sector de procesos industriales de San Luis Potosí (2000-2006).

Categorías	CO	COVDM	NOx	SO ₂
2A1 Cemento	515 925	118 913	16 085 556	166 148 939
2A2 Cal	116 080	27 666	1 276 882	13 850 690
2A3 Uso Pcaliza	322 273	21 102	902 148	2 690
2A4 Uso Carb-Sodio	6 426	1 532	70 686	766 750
2A6 Asfalto	11 591	829 788 653	69 428	400 212
2A7 Vidrio	623 647	349 602	11 316 528	4 455
2B5 P. Quimicos	114 747	4 836 702	1 007 520	9 951 355
2C Metales	5 820 264	585 402	11 161 678	2 696 377
2D1 Papel	295 587	56 713	2 599 687	25 788 706
2D2 Alimentos-Bebidas	233 401	34 009 159	6 981 665	23 643 246
Uso Solventes	718 734	5 196 830	2 007 949	9 105

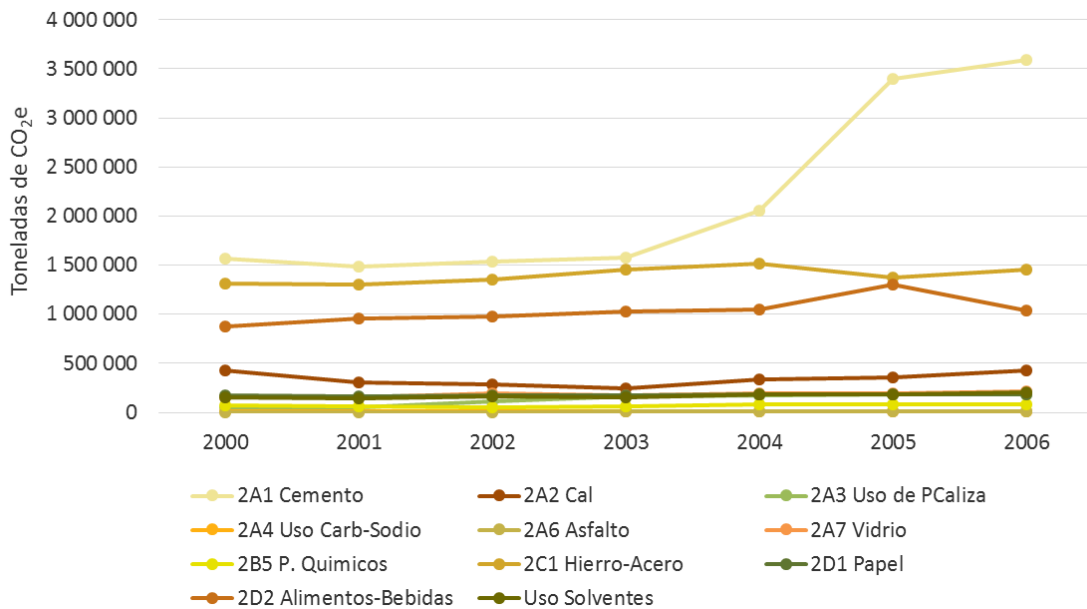
Es necesario definir las subcategorías de mayor contribución en las emisiones de CO₂e. Las Directrices sugieren detectar aquéllas que sumadas explican el 95% de tales emisiones. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente inventario, las subcategorías de mayor contribución en orden descendente fueron: 2A1: cemento, 2C1: hierro y acero, 2D2: alimentos y bebidas, 2A2: cal, 2A3: uso de piedra caliza, 2A7: vidrio; cuyas contribuciones en conjunto representan el 96% de las emisiones (Gráfica 2.12).

Por otra parte, es importante analizar las tendencias de las emisiones de GEI de cada subcategoría, con el objetivo de detectar y analizar los cambios en las mismas (Gráfica 2.13). Por ejemplo, el marcado incremento en las emisiones de la producción de cemento, la mayor fuente de emisión en términos absolutos, se explica por la apertura de una empresa de este giro industrial; sin embargo, la TAV promedio de las emisiones de esta subcategoría, para el periodo de estudio fue del 16,6%, que no la coloca en el primer lugar de cambios en tendencias.

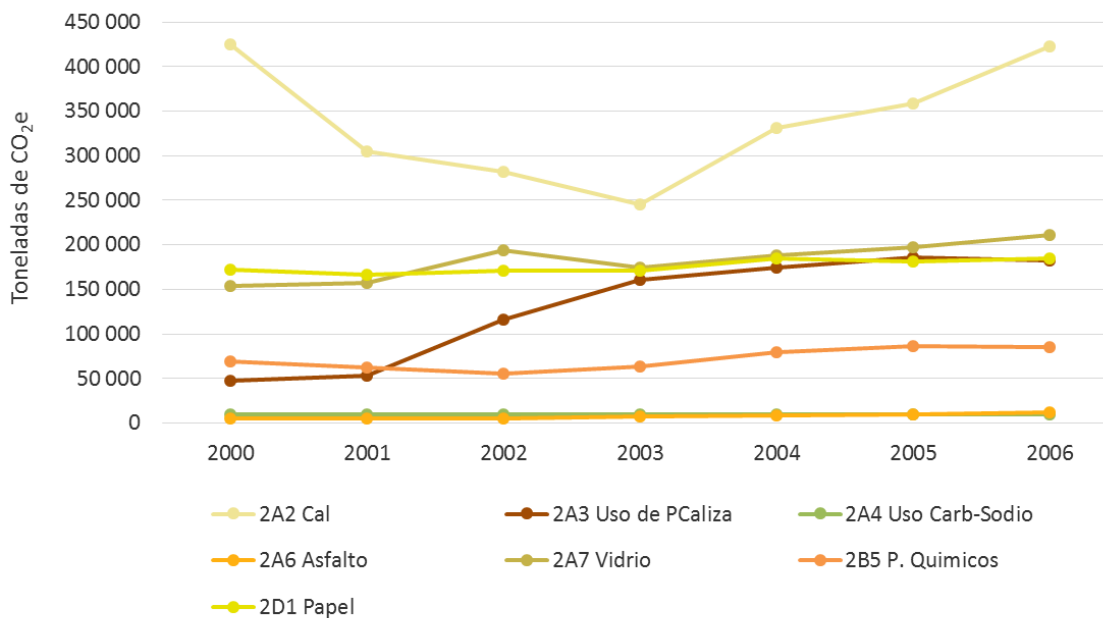


Gráfica 2.12. Contribución por subcategoría, en las emisiones de CO₂e en el sector industrial de San Luis Potosí, durante el periodo 2000-2006.

Siguiendo con el análisis de las tendencias, la subcategoría de fuentes que sustentó la mayor TAV promedio en las emisiones, con un 30,3% fue la 2A4: uso de piedra caliza (Gráfica 2.14); sin embargo, en términos absolutos de emisiones solo contribuyó con el 3% de la totalidad de las emisiones. La elevada TAV promedio de esta subcategoría obedeció a la apertura de dos plantas productoras de piso cerámico, en cuyo proceso se emite CO₂, derivado del uso de carbonatos como materia prima.



Gráfica 2.13. Tendencia de las emisiones de CO₂e de cada subcategoría de fuente del sector industrial.



Gráfica 2.14. Tendencia en las emisiones de CO₂e, sin incluir a las tres subcategorías más contribuyentes en términos absolutos de emisiones (2A1, 2C1 y 2D2).

2.6 Referencias

- Alba, E. (2004). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En J. M. Fernández, Cambio Climático: una visión desde México (págs. 143-153). México: INE.
- Aldrett R., G. (2000). Contaminación atmosférica provocada por fuentes fijas en la ciudad de San Luis Potosí". Trabajo recepcional. UASLP. San Luis Potosí, S.L.P., México.
- ANC. (2011). Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar 2002-2011. Asociación Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. México, D. F.
- Avila G., A., Aldrett, R., G. y Posadas L., C. (2000). "Inventario de emisiones por fuentes fijas en la ciudad de San Luis Potosí". Foro Internacional sobre caso en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. San Luis Potosí, S.L.P., México. Memorias en CD.
- Barros, V. (2005). El cambio climático global (2a. ed.). Buenos Aires, Argentina: Libros del Zorzal.
- Braatz, B. y Bloorn, M. (2004). Manejo del proceso de elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. New York: PNUD-FMAM.
- Bonilla Cárdenasa, J. A., y Lemus Flores, C. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencia Pecuaria*(3), 215-246.
- Chen, K., Yang, H., Ma, Z., Bi, Y., y Huang, L. (2013). Influence of temperature to the short-term effects of various ozone metrics on daily mortality in Suzhou, China. *Atmospheric Environment*(79), 119-128.
- Chen, R., Pan, G., Zhang, Y., Xu, Q., Zeng, G., Xu, X., . . . Kan, H. (2011). Ambient carbon monoxide and daily mortality in three Chinese cities: The China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES). *Science of the Total Environment*(409), 4923-4928.
- Chapin III F. S., Matson P. A., Mooney H. A. (2002). Principles of terrestrial ecology ecosystems. New York: Springer.

CICC. (2007). Estrategia nacional de cambio climático 2007. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. México, D. F.: SEMARNAT.

CONAMA (2009). Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile.

CONAMA (1999). Guía para el control y la prevención de la contaminación industrial. Fabricación de vidrio y productos de vidrio. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile.

CMNUCC (1992). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. FCCC/INFORMAL/84*. Recuperado el 25 agosto de 2013, de: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

CMNUCC (2012). Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 17º período de sesiones, celebrado en Durban del 28 de noviembre al 11 de diciembre de 2011. FCCC /CP/2011/9/Add.1. Recuperado el 15 de septiembre de 2013, de: <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/spa/09a01s.pdf>

Cuatecontzi D. H. y Gasca J. (2002). Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas. En J. Martínez, Cambio Climático: una visión desde México (págs. 86-98). México, D.F.: INE.

Dlugokencky, E. J., Nisbet, E. G., Fisher, R. y Lowry, D. (2011). Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*(369), 2058–2072.

DOF (2005). Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación, DOF 25/04/2005. Recuperado el 16 de abril de 2013, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2034062&fecha=25/04/2005

Etheridge , D. M., Steele, L. P., Francey, R. J., Barnola, J. M., Morgan, V. I. y Langfelds, R. L. (1996). Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Geophysic*, 4115-4128.

Funk, T. H., Chinkin, L. R., Roberts, P. T., Saeger, M., Mulligan, S., P´aramo, V. H. y Yarbrough, J. (2001). Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *The Science of the Total Environment*(276), 135-151.

Galán Madruga, D. y Fernández Patier, R. (2006). Implicación de los NOx en la Química Atmosférica. M+A. *Revista Electrónica de Medio Ambiente*(2), 90-103.

IEA (2014). 2014 Key world energy statistics. International Energy Agency. OECD/IEA. Paris.

IEH (2010). Proceedings of the 2010 Annual UK review meeting on outdoor and indoor air pollution research, 13–14 April 2010 (Web Report W27). Institute of Environment and Health, Cranfield University, UK.

INE (2009). Guía para la elaboración de programas estatales de acción ante el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología. México.

INE-SEMARNAT (2003). Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.: INE.

INE-SEMARNAT (2006,). Inventario nacional de emisiones de México 1999. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

INE-SEMARNAT (2009). México cuarta comunicación nacional ante la CMNUCC. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales México: Solar, servicios editoriales, S.A. de C.V.

INE-SEMARNAT (2011,). Inventario nacional de emisiones de México 2005. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

INE-SEMARNAT (2012). Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2010. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.: INE.

INEGI (2002, 2004, 2006 y 2008). Encuesta industrial anual. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

INEGI (2000, 2008 y 2011). La industria siderúrgica en México. Series estadísticas sectoriales. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

INEGI (2001). Sistema de cuentas nacionales de México. Producto interno bruto por entidad federativa 1993-2000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.

INEGI (2005). Sistema de cuentas nacionales de México. Producto interno bruto por entidad federativa 1999-2004. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.

INEGI (2009). Sistema de cuentas nacionales de México. Producto interno bruto por entidad federativa 2003-2008. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.

INEGI (2012). Sistema de cuentas nacionales de México. Producto interno bruto por entidad federativa 2007-2011. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.

IPCC (1997). Greenhouse gas inventory reference manual. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories Volume 3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) and the International Energy Agency (IEA). United Kingdom.

IPCC (1997). Greenhouse gas inventory reporting instructions. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories Volume 1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) and the International Energy Agency (IEA). United Kingdom.

IPCC (1997). Greenhouse gas inventory workbook. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories Volume 2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) and the International Energy Agency (IEA). United Kingdom.

IPCC (1997). Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas. Informe técnico.

IPCC (2000). Guía de las buenas prácticas y manejo de incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero del IPCC. Unidad de apoyo técnico para el programa de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero del IPCC, Kanagawa, Japón.

IPCC (2007). Summary for Policymakers. In: 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. enhen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley.

Lin, C.-J., Ho, T., Chu, H.-W., Yang, H., Mojica, M., Krishnarajanagarb, N., . . . Hopper, J. (2005). A comparative study of US EPA 1996 and 1999 emission inventories in the west Gulf of Mexico coast region, USA. *Journal of Environmental Management*, 75, 303-313.

Lenton, T. M. y Vaughan, N. E. (2009). The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5539-5561.

DOF (2012). Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación. DOF 06-06-2012. México.

Marland, G. y Boden, T. (2001). The increasing concentration of atmospheric CO₂: how much, when and why?. Erice International Seminars on Planetary Emergencies, (pág. 18). Tennessee.

McGraw, J., Hass, P., Young, L. y Evens, A. (2010). Greenhouse gas emissions in Chicago: Emissions inventories and reduction strategies for Chicago and its metropolitan region. *Journal of Great Lakes Research*(36), 106-114.

Monks, P. S., Carpenter, L. J., Penkett, S. A., Ayers, G. P., Gillette, R. W., Galbally, I. E. y Meyer, C. P. (1998). Fundamental ozone photochemistry in the remote marine boundary layer: the SOAPEX experiment, measurement and theory. *Atmospheric Environment*, 32(21), 3647-3664.

Nakicenovic, N., Grubler, A. y McDonald A. (1998). *Global energy perspectives*. International Institute for Applied Systems Analysis and World Energy Council. IIASA-WEC. Laxenburg, Austria.

Nelson, G. C., Bennett, E., Berhe, A. A., Cassman, K., DeFries, R., Dietz, T., . . . Zurek, M. (2006). Anthropogenic drivers of ecosystem change: an overview. Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art29/> .

Olivo, G. (2013). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector energía, balance estatal de energía y estrategias de mitigación*. Tesis de maestría, UASLP, S. L. P., México.

Organización de las Naciones Unidas (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, p 4.

Parra Z., R., Apaza M., G. y Agramont A., A. (2010). Estimación de factores de emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales. *Revista Boliviana de Química*, 27(2), 81-88.

PECC 2009-2012 (2009). Programa Especial de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación, DOF: 28/08/2009. México. Recuperado el 12 de marzo de 2011, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5107404&fecha=28/08/2009

Prather, M. J., Holmes, C. D. y Juno, H. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*(32), 1-5.

SDE. (2010). Panorama Económico del Estado de San Luis Potosí Cuarto Trimestre 2010. Secretaría de Desarrollo Económico. San Luis Potosí, México.

SE (2007). Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2006. Secretaría de Economía. México.

SE (2010). Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2009. Secretaría de Economía. México.

SEDECO (2006, 2014). Panorama económico del estado de San Luis Potosí. Secretaría de Desarrollo Económico del estado de San Luis Potosí. S.L.P., México.

SEMARNAT (2005). Informe de la situación del medio ambiente en México 2005. Compendio de estadísticas ambientales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

SEMARNAT-INE. (2005). Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. México.

SEMARNAT-INECC. (2013). Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. México.

SEMARNAT (2003). Informe de la situación del medio ambiente en México 2002. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Sendiña I. y Pérez V. (2006). Fundamentos de Meteorología. Santiago de Compostela, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela.

Taghavi, M., Cautenet, S. y Arteta, J. (2005). Impact of a highly detailed emission inventory on modeling accuracy. *Journal of Atmospheric Research*(74), 65-88.

Tans, P. (2009). An accounting of the observed increase in oceanic and atmospheric CO₂ and an outlook for the future. *Oceanography*, 22(4), 26-35.

Tremblay A., Varfalvy L., Roehm Ch. y Garneau M. (2005). Greenhouse gases and reservoirs. En A. Tremblay, *Greenhouse Gas Emissions- Fluxes and Processes* (págs. 21-34). Berlin: Springer.

UNFCCC (2003). Report of the Conference of Parties on its eighth session, held at New Delhi. pp. 5-6.

USA-EPA. (2013). Emission Inventory. Recuperado el 15 de diciembre de 2013, de http://www.epa.gov/air/aqportal/management/emissions_inventory/.

US-EPA. (2007). Emissions Factor Uncertainty Assessment. NC, USA.

US-EPA. (s.f.). Emissions factors & AP 42, compilation of air pollutant emission factors. Recuperado el 12 de Marzo de 2013 de: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>.

Capítulo 3. El enfoque bottom-up y el control de calidad: imprescindibles en el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector procesos industriales

María Teresa Gutiérrez Escajeda* Pedro Medellín Milán**
José Antonio Avalos Lozano*** Alfredo Ávila Galarza****

*M.C. en Ingeniería Industrial. Alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales en los Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales (PMPCA) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP); maytte0179@gmail.com

**Dr. en Ciencias en Ingeniería Química. Profesor Investigador en la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP; pmm@uaslp.mx

***Dr. en Ciencias Ambientales. Profesor Investigador en la Facultad de Agronomía de la UASLP; antonio.avalos@uaslp.mx

****Dr. en Sistemas Energéticos y Control de los Procesos. Profesor Investigador en la Facultad de Ingeniería de la UASLP; galarza@uaslp.mx

Este artículo forma parte de los resultados del proyecto: Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). Financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Nota: publicado en: *Ambiente y Desarrollo*, Bogotá (Colombia) Vol. XVIII (34) 93-108, Enero-Junio 2014, ISSN: 0121-7607

Resumen

El presente artículo muestra la importancia de la aplicación conjunta del enfoque bottom-up y las actividades de control de calidad (CC), en la estimación de los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI). Se realizó el inventario de emisiones de GEI del sector de procesos industriales en el estado mexicano de San Luis Potosí para el periodo 2000-2006, de acuerdo a la metodología propuesta por el IPCC, para lo cual se utilizaron diversas bases de datos de gobierno. La estimación de las emisiones de GEI se realizó primero bajo un enfoque top-down, y posteriormente se aplicaron de forma conjunta el enfoque bottom-up y los procedimientos de CC, para una segunda estimación. Las emisiones en el primer

caso fueron 123 820 391 toneladas de CO₂ equivalentes y para el segundo caso 44 948 012. Esta diferencia se debe a la detección y corrección oportuna de los errores en las bases de datos, por la aplicación del enfoque bottom-up y CC. Finalmente, se plantea una secuencia lógica que conviene seguir en las actividades de CC, para el caso específico en el que los datos provienen de bases gubernamentales en las que se concentra la información de las empresas.

Palabras clave: enfoque de arriba hacia abajo, enfoque de abajo hacia arriba, control de calidad, inventario de emisiones, gases de efecto invernadero.

Abstract

This article shows the importance of the combined application of both, the bottom-up approach and activities of quality control in conducting inventories of greenhouse gases (GHGs). The inventory of GHG emissions from the industrial processes sector in the Mexican state of San Luis Potosi for the period 2000-2006, was performed according to the methodology proposed by the IPCC, for which a variety of government databases were used. The estimate of GHG emissions was first performed by a top-down approach, and subsequently by both, the bottom-up approach and by quality control procedures in order to make a new corrected estimate. The emissions in the first case were 123 820 391 tonCO₂e, and in the second 44 948 012 tonCO₂e. This difference is due to timely detection and correction of errors in databases, by applying the bottom-up/quality control approach. Finally, the logical sequence that the quality control activities should follow are proposed, for the specific case in which data for the estimation come from government databases that only reproduce and concentrate information of enterprises.

Key words: bottom-up approach, top-down approach, quality control, emission inventory, greenhouse gases.

3.1. Introducción

Los inventarios de emisiones a la atmósfera son una fuente de información importante que se aplica para diversos propósitos: identificar las principales fuentes de emisión para aplicar las estrategias adecuadas y reducir sus impactos; así como servir de datos de entrada en la modelación de dispersión de contaminantes (McGraw et al., 2010). Debido a la relevancia del inventario de emisiones, existe una demanda creciente para mantenerlos cada vez más precisos y actualizados (Lin et al., 2005; Taghavi et al., 2005).

El grado de detalle o alcance de un inventario de emisiones al aire depende del enfoque que se aplique durante su realización, ya sea el bottom-up (de abajo hacia arriba), que utiliza datos específicos del punto de emisión o el top-down (de arriba hacia abajo), cuyo grado de detalle consiste en datos agregados a nivel sectorial, municipal, estatal o nacional (Davison et al., 2008; US-EPA).

En algunos inventarios se han comparado los cálculos de las emisiones de fuentes móviles que se obtuvieron aplicando tanto el enfoque top-down como el bottom-up, y los resultados han reflejado tendencias similares en ambos, pero con diferencias en los valores absolutos; mientras que en otros casos se obtuvieron tanto tendencias como valores totalmente discrepantes (Puliafito et al., 2011; Ciancarella et al., 2011; Pallavidino et al., 2011). Otros inventarios de fuentes móviles que se estimaron bajo el enfoque bottom-up o una combinación de los enfoques top-down y bottom-up han sido de gran utilidad para suministrar datos en la modelación de la calidad del aire (Ho y Clappier, 2011; Borge et al., 2011).

Los inventarios de fuentes puntuales estimados bajo el enfoque bottom-up requieren datos de actividad específicos (Zhao et al., 2012; Jaramillo et al., 2005). Sin embargo, en la mayoría de los países, las emisiones a la atmósfera generadas por procesos industriales están normadas por instancias de gobierno, por lo que la mayoría de las empresas solo proporcionan información de sus emisiones a estas autoridades reguladoras (Baek et al., 2004; UPB, 2006). Por lo anterior, las bases

de datos de instancias gubernamentales se convierten en una opción factible para realizar la estimación de los inventarios (SMA-DF, 2010; Funk et al., 2001).

En un inventario llevado a cabo bajo el enfoque bottom-up se pueden identificar con mayor precisión las principales fuentes de emisión, de tal forma que el inventario se convierte en una fuente confiable para la elección de las estrategias de reducción de emisiones más pertinentes (Dios, 2013). Por otra parte, cuando se aplican también los procedimientos de CC durante la realización de un inventario con enfoque bottom-up, las estimaciones generadas presentan mayor certeza (Funk et al., 2001).

En algunos inventarios, las actividades de CC solo han consistido en la presentación de una lista que incluye las fuentes de información para los datos de actividad (AMBIENTAL POCH, 2008). En otros, se han agregado las listas de chequeo o verificación que fueron usadas para supervisar los procedimientos de adquisición de datos, cálculos, estimación, validación y seguimiento (Minambiente, 2009). En forma más exhaustiva, otros inventarios han presentado con gran detalle cada una de las herramientas de calidad utilizadas, desde las listas de verificación aplicadas de manera específica para cada categoría de fuente, hasta la documentación de cada tipo de error detectado, su corrección y el personal responsable de tal corrección (SMED, 2006; Nielsen et al., 2013).

El presente artículo muestra las diferencias obtenidas en el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector de procesos industriales (IEEGEI-PI) de San Luis Potosí, calculado bajo los dos enfoques: top-down y bottom-up con CC. Se describe, a través de dos ejemplos, la estimación bajo los dos casos, así como las diferencias obtenidas. Además, se presenta el resultado del IEEGEI-PI bajo los dos enfoques. Finalmente, se propone una secuencia lógica sobre los procedimientos de CC que conviene aplicar cuando los datos que servirán para la estimación provienen de bases que solo transcriben y concentran la información de industrias y gobierno.

3.2 Metodología

Las estimaciones del IEEGEI-PI, realizadas bajo los dos enfoques, se sustentaron en la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático (IPCC), comprendiendo el periodo 2000-2006. Específicamente, las guías utilizadas fueron: las Directrices versión 1996, las Buenas Prácticas y la Gestión de la Incertidumbre, así como los Manuales de Referencia (IPCC, 1997, 2000). Además, en algunos casos se utilizaron los factores de emisión de las mismas Guías, versión 2006. La metodología se enfoca, de forma general, en la estimación de las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) con el uso de datos de actividad (DA) y los factores de emisión (FE) correspondientes, para lo cual se establece:

$$E = DA \times FE$$

Donde:

E = Emisión del gas en cuestión.

DA = Cantidad de actividad o producción de material del proceso en cuestión.

FE = Factor de emisión asociado al gas correspondiente.

A diferencia de lo que establecen las Guías del IPCC, en el presente IEEGEI-PI también se incluyeron las emisiones de GEI derivadas del uso de combustible en los procesos industriales, de tal forma que se establecieron dos grupos dentro del sector de procesos industriales: las emisiones derivadas de los procesos; esto es, las generadas, exclusivamente, por la transformación de las materias primas utilizadas en el proceso; y el segundo grupo, correspondiente a las emisiones generadas por el uso de combustible en el proceso productivo. Cabe mencionar que para este último grupo, las emisiones de GEI fueron estimadas como CO_{2e} (dióxido de carbono equivalente).

El uso de las unidades de CO_{2e}, es para unificar las unidades de emisión de los diferentes GEI y comparar las emisiones entre diferentes sectores. Para hacer las equivalencias se toma en cuenta el potencial de calentamiento de cada uno de estos

gases. Para el CO₂, se asigna como poder de calentamiento a la unidad; y considerando un horizonte de vida de 100 años, el poder de calentamiento asignado al metano (CH₄) es 21 y para el óxido nitroso (N₂O) 310 (IPCC, 2008).

Conforme a la metodología y la clasificación del IPCC, las categorías incluidas en el IEEGEI-PI fueron: productos minerales (2A), industria química (2B), producción de metales (2C), otros productos industriales (2D), producción de halocarbonos y hexafluoruro de azufre (2E), consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre (2F); así como la categoría de uso de solventes. En cada una de estas categorías se incluyen distintas subcategorías.

Se tomó como año base el 2005, debido a que los datos correspondientes a la base DATGEN fueron los más completos. Para los años que no se contó con información se utilizaron los datos sustitutos más pertinentes, dependiendo de cada categoría. El IPCC sugiere el uso de datos sustitutos, siempre y cuando la estimación se vincule a la fuente de datos estadísticos que explique mejor las variaciones de la categoría a través del tiempo; por ejemplo, las emisiones industriales pueden relacionarse con los niveles de producción del ramo o sector correspondiente (IPCC, 1997).

Como lo recomienda la Guía de las Buenas Prácticas y la Gestión de la Incertidumbre, se aplicaron las técnicas generales de CC: detección de la ocurrencia de errores de transcripción en las entradas de cada cifra, verificación para asegurar que las emisiones hayan sido calculadas correctamente, revisión para confirmar que los factores de conversión y las unidades utilizadas hayan sido las correctas, comprobación sobre la coherencia de los datos entre categorías de fuentes, entre otras. Además, se realizaron procedimientos específicos de CC: requerimientos energéticos de cada proceso, comparación entre los índices de producción por categoría y los estatales o nacionales, inspección visual con gráficas para detectar

diferencias en parámetros relativos (unidades energéticas por unidad de producción) o para detectar datos inusuales (IPCC, 2000).

Con el propósito de realizar el inventario bajo los dos enfoques, el top-down y bottom-up, se recurrió a la búsqueda exhaustiva de datos con diferente escala espacial: a nivel de planta, locales (municipio) y estatales. Por otra parte, los datos agregados a nivel estatal o nacional que se obtuvieron de series estadísticas oficiales, sirvieron para la estimación bajo el enfoque top-down y para confrontar la información utilizada, con la finalidad de aplicar los procedimientos de CC.

Para estimar las emisiones se requiere conocer la magnitud anual de las actividades para cada una de las categorías integradas en el inventario; éstas pueden consistir en: cantidad de materias primas utilizadas, la producción anual correspondiente a cada categoría o empresa, tipo y cantidad de combustible consumido, entre otras. Para adquirir esta información se aplicaron diferentes recursos y se utilizaron diversas bases de datos (Figura 3.1).

La primera fuente de información fue el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), en el cual se incluye información general de la totalidad de los establecimientos empresariales ubicados en San Luis Potosí. De la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM) se obtuvieron bases de datos de los permisos de operación de las empresas, así como algunos datos de las Cédulas de Operación Anual estatales (COA). A través del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) se obtuvieron, vía electrónica, las emisiones de GEI de algunas empresas. La información de mayor utilidad, por ser la más completa, se obtuvo de la base de Datos Generales del 2005 (DATGEN), que es una base controlada e integrada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

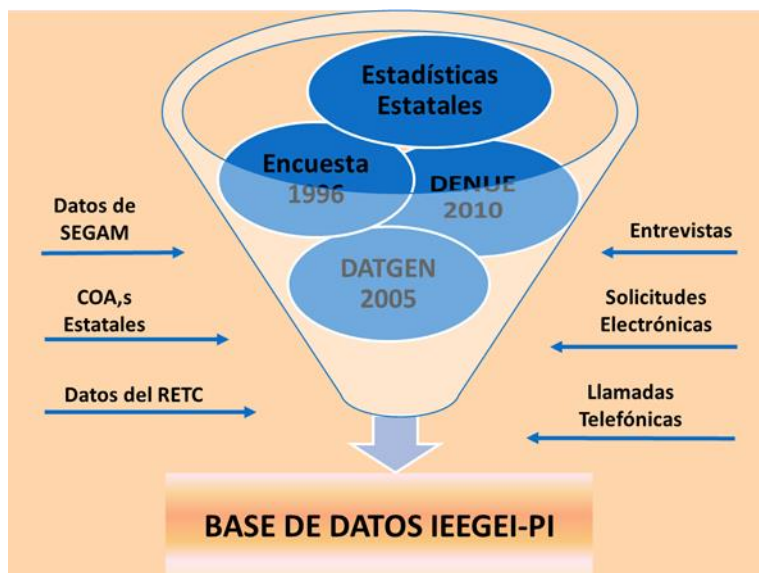


Figura 3.1. Esquema integrador de las bases de datos y los recursos utilizados en el desarrollo del IEEGEI-PI de San Luis Potosí.

De acuerdo a los resultados obtenidos, y tomando en cuenta la contribución de cada una de las categorías de fuentes incluidas en el IEEGEI-PI, a continuación se muestran los resultados de la aplicación del enfoque top-down, así como del bottom-up y las actividades de CC, para la estimación de las emisiones de GEI en cada una de las dos subcategorías que más contribuyeron en las emisiones del IEEGEI-PI: producción de cemento (2A1), y producción de hierro y acero (2C1).

3.3. Resultados

3.3.1. Caso de la subcategoría 2C1: producción de hierro y acero.

Estimación de GEI con enfoque top-down.

Para llevar a cabo la estimación de las emisiones de CO₂ generadas en la producción de hierro y/o acero bajo el enfoque top-down, se utilizaron los datos agregados de la producción estatal de acero en San Luis Potosí (INEGI, 2005, 2008). Las guías del IPCC asignan un FE de 1.5 toneladas de CO₂ por tonelada de acero, para el caso específico en el que solo se conoce el volumen de producción

como DA; de tal forma que las emisiones de CO₂ se obtuvieron del producto del FE y el DA (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Estimación de las emisiones de CO₂ generadas por la subcategoría de producción de hierro y acero, bajo el enfoque top-down.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Acero (ton)	510 625	506 466	524 717	555 177	578 250	527 954	559 831
CO₂ (ton)	765 938	759 699	787 076	832 766	867 375	791 931	839 747

Fuente: elaboración propia, con datos de INEGI (2006).

Estimación de GEI con enfoque bottom-up y control de calidad.

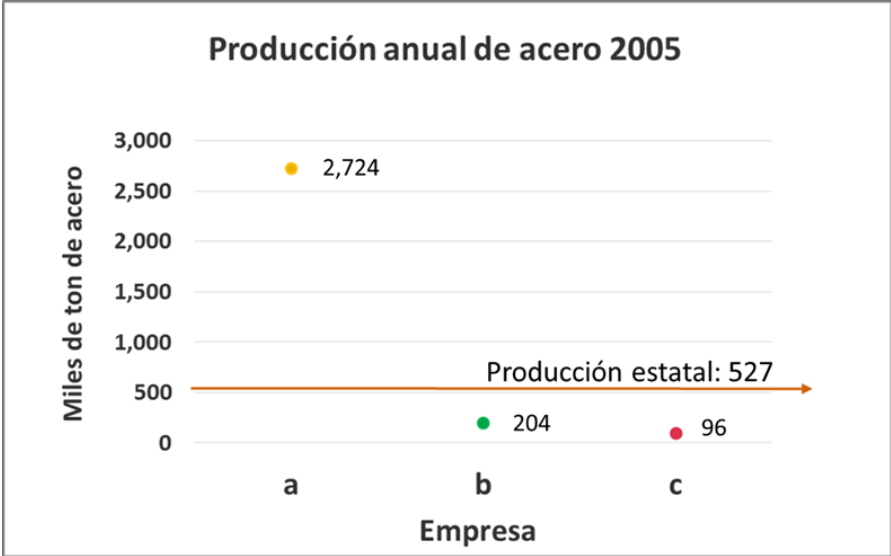
En las bases de datos se identificaron más de una docena de empresas dentro de esta subcategoría; tres de ellas (identificadas para el propósito del estudio como: a, b, c) se destacaron del resto por su volumen en la producción de acero, específicamente, en la fabricación de varilla.

Como parte de las tareas generales de CC, se revisaron y unificaron las unidades de producción de cada empresa de esta subcategoría, incluida en la base DATGEN. La mayoría de las empresas expresó sus unidades en toneladas, excepto la “a”, cuya producción en el 2005 fue de 44 808,77 m³. Para convertir esta cantidad se tomó en cuenta que la densidad de la varilla de acero de 3/8 de pulgada es 7,9 t/m³ (CEMEX, 2012), lo que resultó en un volumen de 2 723 989 toneladas.

Una vez unificadas las unidades de producción, y para continuar con la aplicación del CC, se contrastó la producción anual de cada una de las tres empresas con respecto al total estatal, que para el 2005 fue de 527 954 toneladas (INEGI, 2012). Al comparar la producción de la empresa “a”, ésta resultó por encima del total estatal (Gráfica 3.1).

Por la discrepancia encontrada en la producción de la empresa “a”, se procedió a realizar una búsqueda de información más fiable y con un enfoque bottom-up más puntual. Por aclaración de la misma empresa, se concluyó que la cantidad de la

producción mostrada en la base de DATGEN estaba correcta, pero las unidades eran en toneladas. Después de corregir el error, se procedió a aplicar la metodología para estimar las emisiones de GEI.



Gráfica 3.1. Producción anual de acero en San Luis Potosí. Volumen de los tres principales fabricantes en el estado, según base DATGEN (Fuente: elaboración propia, con datos de INEGI, 2010).

La metodología más precisa para estimar las emisiones de CO₂ para esta categoría, según la Guía de las Buena Prácticas (IPCC, 2000) es emplear como DA la cantidad del agente reductor en la producción de hierro y acero; esto es, el carbón o coque utilizado (IPCC, 1997). En la base de DATGEN, varias empresas informaron la cantidad de carbón o coque utilizada, con lo cual se logró establecer una relación entre la cantidad de acero producido y la de carbón utilizada.

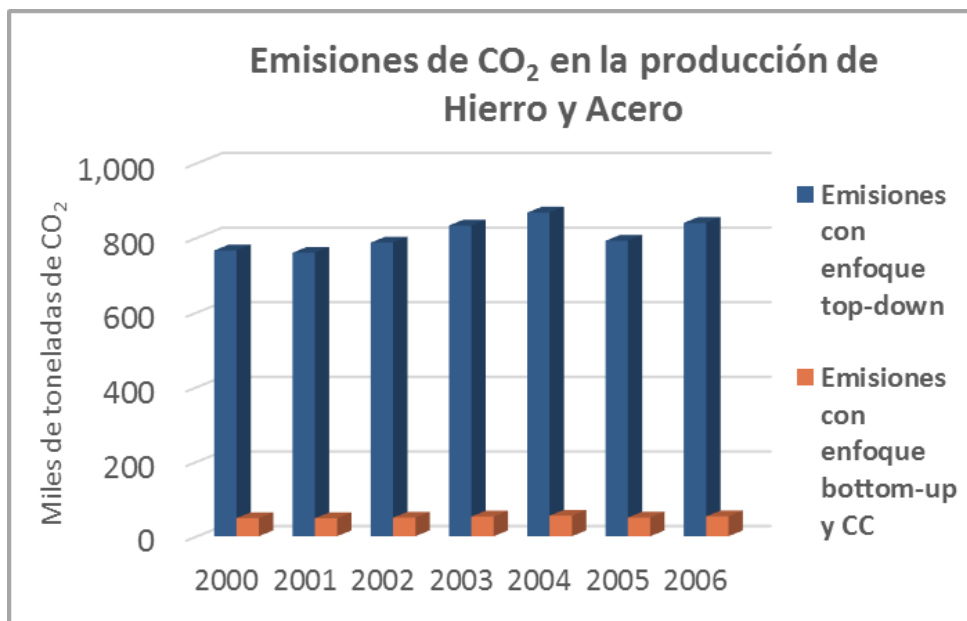
En el 2005, la cantidad de carbón utilizada por la totalidad de las empresas de la presente subcategoría fueron 16 186,58 toneladas. Para estimar la cantidad de carbón para el resto de los años del inventario, se utilizó como dato sustituto la tasa de variación anual en la producción de acero estatal (INEGI, 2005, 2008). Finalmente, se estimaron las emisiones de cada año, para lo cual se utilizó un FE

de 3.1 tCO₂ por tonelada de agente reductor (grafito o coque), que es el FE por defecto, sugerido por el IPCC (Tabla 3.2).

Los resultados de las emisiones totales de GEI de la presente subcategoría bajo el enfoque top-down fueron 5 644 532 tCO₂. Después de haber aplicado el enfoque bottom-up y el CC, con lo cual se logró una mayor precisión en el cálculo, las emisiones resultaron en 357 650 toneladas. Una comparación de las emisiones anuales bajo los dos enfoques muestra la magnitud de las diferencias obtenidas, de tal forma que bajo el enfoque top-down se obtuvo una sobrestimación en las emisiones de diez veces más que la real (Gráfica 3.2).

Tabla 3.2. Emisiones de CO₂ generadas por la subcategoría de producción de hierro y acero, bajo el enfoque top-down y CC.

Año	Coque	Emisiones
	Ton	Ton CO ₂
2000	15 655,29	48 531,41
2001	15 527,78	48 136,13
2002	16 087,34	49 870,76
2003	17 021,22	52 765,77
2004	17 728,61	54 958,70
2005	16 186,59	50 178,41
2006	17 164,25	53 209,19



Gráfica 3.2. Emisiones de CO₂, exclusivas del proceso productivo, en la subcategoría de hierro y acero de San Luis Potosí, estimadas bajo ambos enfoques.

3.3.2. Caso de la subcategoría 2A1: Producción de Cemento

Estimación de las emisiones de GEI por el consumo de combustible con enfoque top-down.

En San Luis Potosí se ubican tres empresas dedicadas a la producción de cemento. De la base de datos DATGEN se tomó la información agregada del combustible de las tres empresas, que en el 2005 consumieron 3 382 807 m³ de combustóleo. Para conocer la cantidad de combustible para el resto de los años del inventario, se utilizó como dato sustituto la tasa de variación anual de la producción nacional de cemento, tomando como base el 2005 (CANACEM, 2013). Con la cantidad de combustóleo consumido se estimaron las emisiones de CO_{2e} para cada año del inventario (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Emisiones de CO₂e generadas por el uso de combustible en la subcategoría de producción de cemento, estimadas bajo el enfoque top-down.

Año	*CBL	FE CO ₂	CO ₂	FE CH ₄	CH ₄	FE N ₂ O	N ₂ O	Emis CO ₂ e
	m ³	Ton CO ₂ /m ³	Ton	Ton CH ₄ /m ³	Ton	Ton N ₂ O/m ³	Ton	Ton
2000	3 089 696	3,11	9 619 879	1,21E-04	373	2,41E-05	75	9 650 826
2001	2 924 003	3,11	9 103 986	1,21E-04	353	2,41E-05	71	9 133 274
2002	3 031 216	3,11	9 437 799	1,21E-04	366	2,41E-05	73	9 468 161
2003	3 109 189	3,01	9 373 132	1,17E-04	363	2,34E-05	73	9 403 286
2004	3 236 576	3,11	10 070 889	1,21E-04	390	2,41E-05	78	10 103 288
**2005	3 382,807	2,93	9 917 876	1,14E-04	384	2,27E-05	77	9 949 782
2006	3 694 766	2,93	10 832 492	1,14E-04	420	2,27E-05	84	10 867 341
2007	3 221 820	2,92	10 607 823	1,13E-04	411	2,41E-05	82	10 641 949

*Combustóleo **Año base

Estimación de GEI con enfoque bottom-up y control de calidad.

De la base de datos DATGEN se identificaron las tres empresas productoras de cemento (identificadas para el propósito del estudio como: a, b, c), así como sus respectivas cantidades de producción, materias primas y combustible consumido. De acuerdo a la cifra reportada del cemento producido, se realizó el cálculo del clinker, que es el primer producto dentro del proceso en la producción del cemento.

Antes de hacer la estimación de las emisiones por el uso de combustible para la subcategoría de cemento bajo el enfoque bottom-up, se aplicaron los procedimientos generales de CC, y posteriormente se llevó a cabo un cálculo de referencia como medida de CC, para conocer la intensidad energética por unidad física de producción para cada una de las empresas. De esta forma se comprobó si las cantidades de combustible eran congruentes con el volumen de producción.

La cantidad y el tipo de combustible reportado permitió calcular la intensidad energética (IE) para cada empresa (Tabla 3.4); esto es, la relación entre el consumo energético y las unidades producidas:

$$IE = CE / PT$$

Donde:

IE = intensidad energética, CE = Consumo de energía, PT= producción total

Para el consumo de energía, se utilizó un poder calorífico de 37 858,4412 MJ por metro cúbico de combustóleo (SENER, 2006).

Tabla 3.4. Intensidad energética en la producción de clinker en el 2005 con datos de DATGEN.

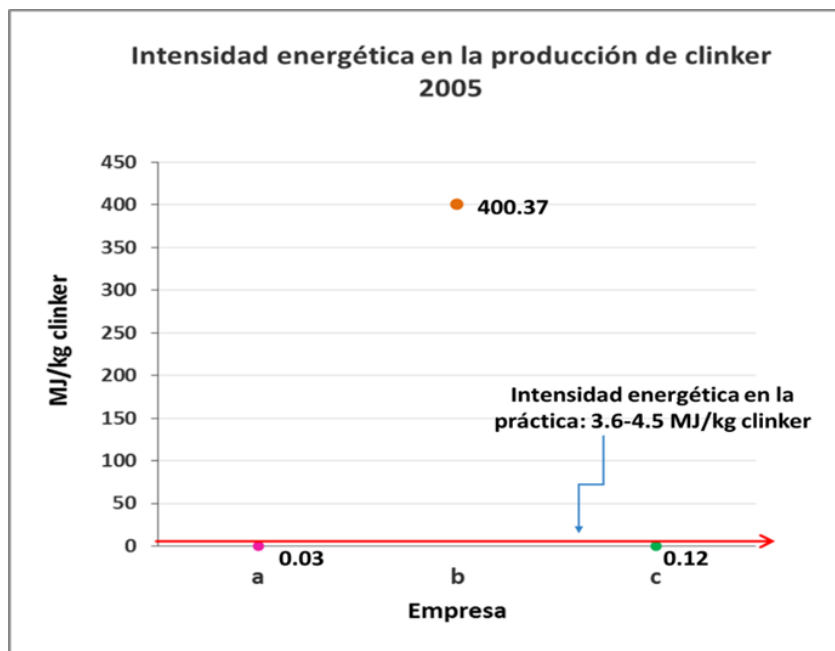
Empresa	Clinker	Combustóleo	Consumo energético por combustóleo	Intensidad Energética
	Kg	m ³	37,858.44 MJ/m ³	*MJ/kg clinker
a	935 557 000	710,84	26 911 294	0,03
b	319 419 000	3 378 013,00	127 886 306 533	400,37
c	1 302 471 000	4 083,36	154 589 645	0,12

* Megajoules

En la práctica, el consumo energético requerido para la fabricación de un kilogramo de clinker oscila entre 3,6-4,5 MJ (Gilisagasti y Elorza, 1999; IMCYC, 2000; Ministerio de Medio Ambiente, 2004). Considerando esto, se concluye que en definitiva, la intensidad energética de cada una de las empresas analizadas está fuera de este rango (Gráfica 3.3). Por esto, se procedió a realizar una búsqueda de información más fiable y con un enfoque bottom-up más puntual, sobre los DA de las empresas.

La empresa “a” proporcionó la información de sus emisiones anuales de CO₂, para el periodo 2004-2006, desglosándolas en emisiones generadas por el uso de combustible, y las liberadas por el proceso. Se obtuvo que el 34% de las emisiones generadas en la producción de cemento fueron atribuibles al uso de combustible, porcentaje que está dentro del rango normal de las emisiones por el uso de combustible en la producción de cemento (Ali et al., 2011; Anand et al., 2006).

De la base del RETC, se conocieron las emisiones totales de las empresas “b” y “c” para el período 2004-2006, a las cuales se les aplicó la proporción de 34% para estimar las emisiones generadas por el uso de combustible, asumiendo una similitud en los procesos productivos. Posteriormente, se aplicó el FE correspondiente y se calculó la cantidad de combustóleo (Tabla 3.5).



Gráfica 3.3. Intensidad energética de las empresas cementeras con respecto a la producción estatal. Cálculos a partir de DATGEN.

Tabla 3.5. Cálculo regresivo del combustóleo (cbl) usado por las empresas productoras de cemento, en el 2004.

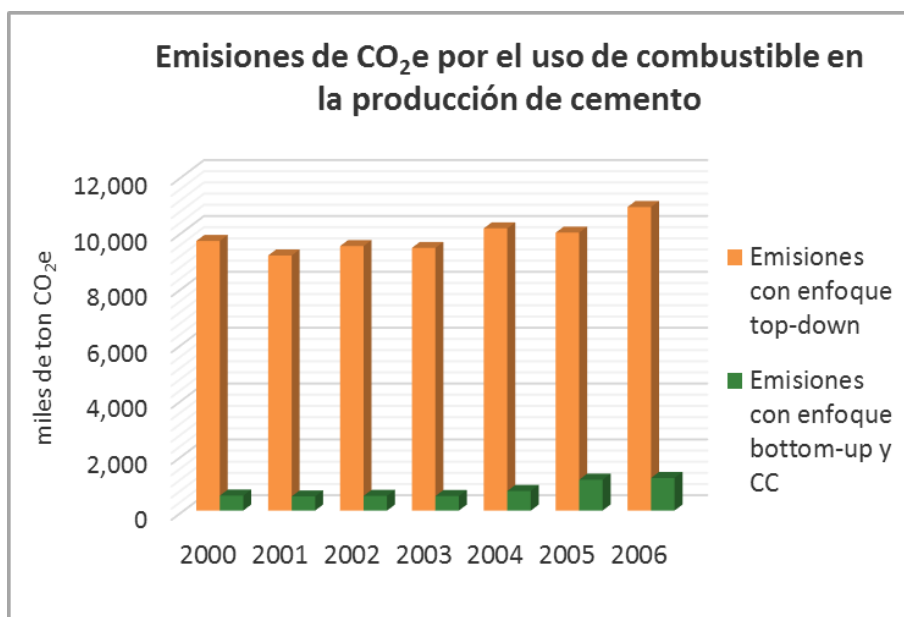
Empresa	Emisiones totales	Emisiones por combustible	Factor de emisión del CBL	Combustible (m ³)
	Ton	34%	Ton CO ₂ /m ³	DA=E/FE
a	411 768	140 737	3,11	45 253
b	372 149	126 531	3,11	40 685
c	1 269 476	431 622	3,11	138 785

Para hacer la estimación de los años 2000-2003, se utilizó el dato sustituto de la tasa de variación anual de la producción nacional de cemento (CANACEM, 2013). Finalmente, con los datos estimados del combustóleo para el período completo del inventario, se estimaron las emisiones anuales con enfoque bottom-up y CC (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Emisiones de CO₂e generadas en la subcategoría de producción de cemento, por el uso de combustible, con enfoque bottom-up y CC.

Año	CBL	FE CO ₂	CO ₂	FE CH ₄	CH ₄	FE N ₂ O	N ₂ O	CO ₂ e
	m ³	Ton CO ₂ /m ³	Ton	Ton CH ₄ /m ³	Ton	Ton N ₂ O/m ³	Ton	Ton
2000	171 362	3,11	533 540	1,21E-04	21	2,41E-05	4	535 257
2001	162 172	3,11	504 928	1,21E-04	20	2,41E-05	4	506 552
2002	168 118	3,11	523 442	1,21E-04	20	2,41E-05	4	525 126
2003	172 443	3,01	519 855	1,17E-04	20	2,34E-05	4	521 528
2004	224 723	3,11	699 246	1,21E-04	27	2,41E-05	5	701 495
2005	375 647	2,93	1 101 338	1,14E-04	43	2,27E-05	9	1 104 881
2006	396 624	2,93	1 162 842	1,14E-04	45	2,27E-05	9	1 166 582

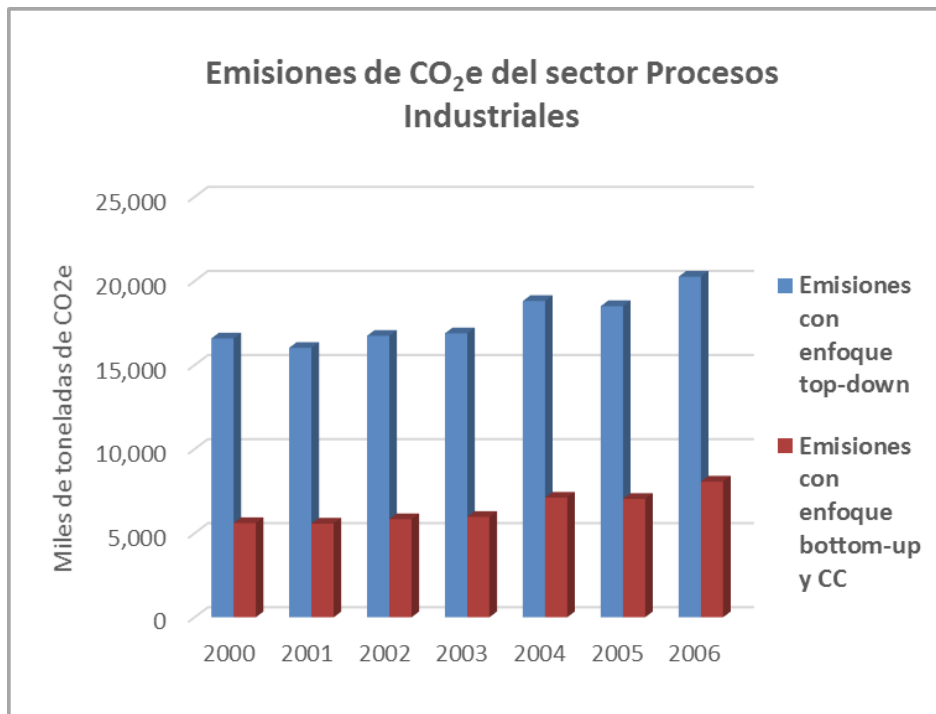
Los resultados de las emisiones totales de GEI de la presente subcategoría bajo el enfoque top-down fueron 68 575 958 tonCO₂. Después de haber aplicado el enfoque bottom-up y el CC, con lo cual se logró una mayor precisión en el cálculo, las emisiones obtenidas fueron 5 061 422 tonCO₂. Una comparación de las emisiones anuales bajo los dos enfoques muestra las diferencias obtenidas, de tal forma que bajo el enfoque top-down se obtuvo una sobrestimación en las emisiones totales de hasta trece veces más a las que realmente correspondían (Gráfica 3.4).



Gráfica 3.4. Emisiones de CO₂e por el uso de combustible en la subcategoría de cemento de San Luis Potosí, estimadas bajo ambos enfoques.

Resultados totales del IEEGEI-PI

Después de haber llevado a cabo las estimaciones correspondientes a cada categoría del sector de procesos industriales, bajo ambos enfoques, las diferencias que se obtuvieron son evidentes (Gráfica 3.5). Para el periodo completo del inventario, 2000-2006, las emisiones de CO₂e bajo el enfoque top-down fueron 123 820 391 toneladas; y después de haber aplicado las herramientas de CC y el enfoque bottom-up, estas mismas fueron 44 948 012. Cabe mencionar que, aunados a los dos ejemplos anteriormente expuestos en este artículo, se identificaron y corrigieron otras anomalías detectadas en los datos de mas subcategorías.



Gráfica 3.5. Emisiones totales de CO₂e del sector de Procesos Industriales. Incluyen las emisiones por la transformación de materias primas y por el uso de combustible en los procesos.

3.4. Conclusiones y Recomendaciones

Puliafito et al. (2011) realizaron un inventario de emisiones de fuentes móviles bajo los dos enfoques que se tratan en el presente artículo; y concluyeron que las tendencias en los resultados eran semejantes, pero con diferencias en los valores absolutos de las emisiones. Por su parte, Dios Noceda (2013) indica que uno de los grandes beneficios de haber aplicado el enfoque botto-up en el inventario fue la detección de las categorías principales de emisión.

Nosotros hemos experimentado lo que los autores arriba mencionados concluyeron en sus inventarios de fuentes móviles; sin embargo, hemos demostrado que, tratándose de un inventario de emisiones para fuentes fijas, las diferencias obtenidas al aplicar los enfoques en cuestión pueden llevar a estimaciones totalmente discrepantes: las emisiones de CO₂e estimadas bajo el enfoque top-down alcanzaron 123 820 391 toneladas, y después de haber aplicado el enfoque bottom-up y los procedimientos de CC, éstas fueron 44 948 012. Por otra parte, se identificó que la subcategoría más contribuyente en las emisiones, con un 39%, es la 2A1: cemento; la segunda más contribuyente, con una participación del 22%, es la 2C1: hierro y acero, seguida por la 2D2: alimentos, que contribuye con el 21% del total del IEEGEI-PI.

Identificamos, gracias al enfoque bottom-up, varios puntos importantes y de gran utilidad para perfilar las posibles estrategias de reducción de emisiones: en el 2004 se instaló en San Luis Potosí la tercera empresa productora de cemento, la cual contribuyó con el 33% de las emisiones de la subcategoría de cemento en el 2006, ocupando con esto el segundo lugar dentro de esta subcategoría. Por otra parte, el 85% de las emisiones de GEI de la subcategoría de hierro y acero se generaron solo por tres empresas de este sector; y dentro de la subcategoría de alimentos, el 89% de las emisiones se originaron en la producción de azúcar.

Por otra parte, como se demostró en los ejemplos explicados en este artículo, la aplicación de los procedimientos de CC es una fase necesaria para la estimación

de las emisiones. La detección y corrección oportuna de las anomalías en las bases que sirvieron como DA para la estimación del IEEGEI-PI de San Luis Potosí contribuyó en forma significativa, evitando que las emisiones se sobre estimaran en tres veces más a las correspondientes. Por lo anterior, queremos enfatizar que la aplicación del CC debe convertirse en una tarea imprescindible cuando los DA provienen de bases que solo transcriben y concentran la información que, previamente las empresas han entregado a las instancias gubernamentales ambientales.

Es importantes señalar que detectamos que en las bases de datos utilizadas se otorga una mayor importancia a lo referente a combustibles, más que a las materias primas. Esto se debe a que, en años anteriores, los inventarios solo estaban perfilados en conocer las emisiones de contaminantes, especialmente los llamados contaminantes criterio. Por esto, las bases de datos estaban concentradas en mostrar los tipos y cantidades de combustibles usados en las empresas; sin embargo, para los inventarios de emisiones de GEI, es necesario que las bases incluyan con exactitud los tipos y cantidades de las materias primas utilizadas en los procesos, debido a que muchas de estas son fuentes importantes de GEI.

Tomando en cuenta la gran utilidad del inventario de emisiones, como fuente valiosa de información en las políticas de acción para abatir tanto la contaminación atmosférica como los efectos del calentamiento global, proponemos y recomendamos algunas acciones que pueden ser de utilidad para la estructuración de una nueva base de datos confiable, derivada de las ya existentes en las instituciones gubernamentales ambientales:

1. Tener un conocimiento previo, general, acerca de los procesos productivos de los distintos giros industriales; sobre todo, conocer los requerimientos energéticos en cada proceso. Es importante también conocer los productos generados, las principales materias primas utilizadas y la proporción usada de cada una de éstas

durante el proceso de transformación, así como el tipo de emisiones liberadas por las mismas.

2. Conocer el formato que cada institución gubernamental ambiental opera, como requisito obligatorio que cada empresa debe presentar a la misma. La importancia de esto radica en conocer la temporalidad de cada formato; así como las unidades que requiere para cada uno de los productos o materias primas desglosadas en los formatos. Con lo anterior, se pueden hacer comparaciones con las bases de datos declaradas por las instituciones gubernamentales ambientales, en las cuales la información declarada por las empresas se encuentra resumida y/o agregada.

3. Buscar todos los directorios empresariales existentes, de diferentes años, en los cuales se detalle toda la información posible acerca de cada una de las empresas ubicadas dentro de la región en cuestión. Por ejemplo, conocer con precisión el inicio de operaciones de nuevas empresas, así como la clausura de otras; esto es de gran utilidad cuando los resultados del inventario se utilizan para construir escenarios tendenciales de las emisiones.

4. Buscar y concentrar toda la información estadística agregada posible sobre la dinámica productiva de cada uno de los giros industriales, según la región en cuestión. Aunque el propósito para la estimación del inventario es utilizar el enfoque bottom-up, el tener información agregada a nivel municipal, estatal o nacional, servirá para cruzar la información agregada con la sumatoria de la desagregada. Lo anterior es de utilidad para detectar cifras puntuales anómalas que pudieran rebasar las estadísticas regionales o nacionales.

5. Conocer las características de los combustibles, como su poder calorífico y los Factores de Emisión correspondientes. Al conocer el requerimiento energético de cada uno de los diferentes procesos productivos, se puede hacer una comparación con la cantidad y tipo de combustible que declara cada empresa.

6. Hacer comparaciones a través del tiempo, acerca de las cifras productivas o del combustible consumido por cada empresa, con la finalidad de verificar la consistencia en la dinámica productiva de cada empresa o rama industrial.

7. Utilizar diversas herramientas de calidad, tales como distribuciones de frecuencia, diagramas de puntos, diagramas de dispersión, cálculo de percentiles, entre otras. Esto, con el fin de visualizar y detectar aquéllas cifras que de manera evidente resultan exageradas, ya sea en la cantidad de producto, materias primas o en el combustible consumido.

8. Posteriormente, se sugiere agotar cualquier recurso que permita conocer con exactitud las cantidades identificadas como “sospechosas” o “anómalas”, que resultan incongruentes con la naturaleza del proceso correspondiente. Para esto se debe hacer una búsqueda en sitios oficiales de la empresa, acudir de manera directa a la instancia de gobierno que solicita dicha información a la empresa en cuestión para comparar la cifra con la declarada en años anteriores, realizar llamadas telefónicas a la empresa o acudir directamente a la empresa a solicitar la información.

9. Hacer comparaciones entre empresas que tengan características similares en variables clave: productos, materias primas, número de empleados, entre otras; esto servirá para estimar, por proporción, la cantidad de aquéllas variables no declaradas por alguna de las empresas, y que será útil como DA para estimar las emisiones totales de cada categoría.

10. Finalmente, se recomienda comparar los resultados de cada subcategoría o sector con respecto a su equivalente en otras entidades dentro del país, cuidando en lo posible, que se tengan características similares en dichos sectores. Estas comparaciones pueden resaltar posibles errores que se cometen en los cálculos o hacer evidente la ausencia de información para una estimación más completa.

3.5. Referencias

Ali, M., Saidur, R. y Hossain, M. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2252-2261.

AMBIENTAL POCH. (2008). *Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero*. Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. Santiago, Chile.

Ambiente, M. d. (2004). *Guía de mejores técnicas disponibles en España de fabricación de cemento*. Madrid, España: Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.

Anand, S., Vrat, P. y Dahiya, R. (2006). Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry. *Journal of Environmental Management*, 79, 383-398.

Baek, J., Unal, A., Tian, D. y Russell, A. (2004). Improvements in the Point Source Emissions Inventory for Georgia. *13th International Emission Inventory Conference "Working for Clean Air in Clearwater"*. Clearwater, FL, USA.

Borge, R., Lumbreras, J., Tarrason, L. y Rodríguez, E. (2011). Emission needs at local scale for air quality modelling. *14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, (págs. 767-771). Kos, Greece.

CANACEM. (2013). *Producción de cemento 2000-2012*. Cámara Nacional del Cemento. Recuperado el 14 de Agosto de 2012, de http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm.

CEMEX. (2012). *El Manual del Constructor*. México, D. F.

Ciancarella, L., Briganti, G., Calori, G., Cappelletti, A., Cionni, I., Costa, M., . . . Zanini, G. (2011). National Italian Integrated Atmospheric Model on air Pollution: Sensitivity to emission inventory. *14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, (págs. 277-281). Kos, Greece.

Davison, S., van den Elshout, S., Wester, B., Honoré, C., Lazano, A., Nussio, F., . . . Ziba, B. (2008). *Integrated Urban Emission Inventories*. European Regional Development Fund. Schiedam, the Netherlands.

Dios Noceda, M. (2013). *Estimación, análisis y evaluación de inventarios de emisiones atmosféricas antropogénicas a escala local, regional y continental*. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela. Galicia, España.

Funk, T. H., Chinkin, L. R., Roberts, P. T., Saeger, M., Mulligan, S., Páramo Figueroa, V. H. y Yarbrough, J. (2001). Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *The Science of the Total Environment*, 276, 135-151.

Gilisagasti Pérez, N. y Elorza Uria, E. (1999). *El cemento*. Quito, Ecuador.

Ho, B. Q. y Clappier, A. (2011). Road traffic emission inventory for air quality modelling and to evaluate the abatement strategies: A case of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 45, 3584-3593.

IMCYC. (2000). *Hacia un Concreto Ecológico*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Recuperado el 22 de Septiembre de 2013, en <http://www.imcyc.com/revista/2000/feb2000/ecolog.html>.

INEGI. (2005, 2008). *La industria siderúrgica en México 2011. Serie estadísticas sectoriales*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

IPCC. (1997). *Las Directrices del IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero versión revisada de 1996*.

IPCC. (2000). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre. Capítulo 8 Garantía de la calidad y control de calidad*.

IPCC. (2008). *Cambio Climático 2007 Base de Ciencia Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático*. .

Jaramillo, M., Nuñez, M., Ocampo, W., Pérez, D. D. y Portilla, G. (2005). Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo (Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*, 17, 115-129.

Lin, C.-J., Ho, T., Chu, H.-w., Yang, H., Mojica, M., Krishnarajanagarb, N., . . . Hopper, J. (2005). A comparative study of US EPA 1996 and 1999 emission inventories in the west Gulf of Mexico coast region, USA. *Journal of Environmental Management*, 75, 303-313.

McGraw, J., Haas, P., Young, L. y Evens, A. (2010). Greenhouse gas emissions in Chicago: Emissions inventories and reduction strategies for Chicago and its metropolitan region. *Journal of Great Lakes Research*, 36, 106-114.

Minambiente. (2009). *Manual de Evaluación del Programa de Inventario de Emisiones*. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia.

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M., Winther, M., Gyldenkærne, S., Thomsen, M., Nielsen, M., . . . Bruun, H. (2013). *Quality Manual for the Danish Greenhouse Gas Inventory Version 2*. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy.

Pallavidino, L., Prandi, R., Costa, M., Nanni, A., Bertello, A., Bracco, E. y Pavone, F. (2011). Top-Down vs. Bottom-up approach in delineating traffic role in air quality scenarios. *14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, (págs. 307-311). Kos, Greece.

Puliafita, E., Castro, F. y Allende, D. (2011). *Transporte y calidad del aire en Mendoza informe N° 3: Emisiones del transporte urbano de pasajeros*. Mendoza: Centro de Estudios para el Desarrollo Sustentable.

SENER. (2006). *Balanza nacional de energía 2005*. Secretaría de Energía. México, D. F.

SMED. (2006). *Manual for SMED:s Quality System in the Swedish Air Emission Inventories*. Swedish Environmental Emissions Data. Norrköping, Sweden.

Taghavi, M., Cautenet, S. y Arteta, J. (2005). Impact of a highly detailed emission inventory on modeling accuracy. *Atmospheric Research*, 74, 65-88.

UNEP. (2012). *The Emissions Gap Report 2012*. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP).

UPB. (2006). *Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas en el Valle de Aburrá, con Georreferenciación de estas*. Universidad Pontificia Bolivariana. Valle de Aburrá, Colombia.

US-EPA. (s.f.). *Developing a Greenhouse Gas Inventory*. Unites States Environmental Protection Agency. Recuperado el 22 de Junio de 2013, de <http://www.epa.gov/statelocalclimate/local/activities/ghg-inventory.html>.

Zhao, Y., Nielsen, C. P. y McElroy, M. B. (2012). China's CO₂ emissions estimated from the bottom up: Recent trends, spatial distributions, and quantification of uncertainties. *Atmospheric Environment*, 59, 214-223.

Capítulo 4. Factores determinantes de las emisiones de CO₂ asociadas al uso de combustibles en el sector industrial de San Luis Potosí

¹María Teresa Gutiérrez Escajeda

²Pedro Medellín Milán ¹Carlos Joel Ábrego Góngora

Resumen

El análisis de la dinámica de los factores determinantes de las emisiones de CO₂, y el efecto que estos factores ejercen sobre la variación de las emisiones, brinda argumentos útiles para establecer metas de reducción. En este artículo se analizó la identidad de Kaya para identificar los factores que impulsan la variación interanual de las emisiones de CO₂ originadas por el consumo de combustibles en el sector industrial manufacturero de San Luis Potosí durante el periodo 2000-2012. La indagación determinó que la variación de la intensidad energética y del PIB *per cápita*; y en menor grado el de la intensidad de carbonización de la energía fueron los más contribuyentes en la variación de las emisiones de CO₂ del sector de estudio.

Palabras clave: sector manufacturero, dióxido de carbono, factores determinantes, intensidad de carbonización, intensidad energética, PIB per cápita.

Key words: manufacturing sector, carbon dioxide, determinants, carbonization intensity, energy intensity, per capita GDP.

¹ Doctoranda (do) de los Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

² Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Abstract

The analysis of the dynamics of the determinants of CO₂ emissions and the effect they have on the variation of emissions, provides useful arguments to establish appropriate reduction targets. In this article Kaya identity was analyzed to identify the factors driving the yearly variation of CO₂ emissions caused by the consumption of fuels by the manufacturing sector of San Luis Potosí during the period 2000-2012. The inquiry found that the effect of the energy intensity and GDP *per cápita*; and to a lesser extent the intensity of carbonization of energy, were the factors that contributed the most in the variation of CO₂ emissions.

4.1 Introducción

El uso de combustibles fósiles como fuente energética es uno de los impulsores más importantes en el incremento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, condición que ha intensificado el efecto invernadero sobre el calentamiento global que se ha experimentado en los últimos años (IPCC, 2013). Las emisiones mundiales anuales de CO₂ derivadas del uso de combustibles fósiles y la producción de cemento fueron 8,3 Gt (Gigatoneladas) promediadas entre 2002–2011; esto es, 54% por arriba del nivel de 1990. Por lo anterior, es de gran utilidad analizar la relación entre las emisiones de CO₂ y la dinámica en el uso de los combustibles fósiles.

El análisis de los factores determinantes de las emisiones de CO₂ es una tarea primordial para el establecimiento de estrategias que impacten de forma eficaz y precisa en las metas de reducción de emisiones en cada país. Una de las relaciones más analizadas es la atribuida a las emisiones de CO₂ con el crecimiento económico de cada país o región (Alcántara y Padilla, 2005; Samaniego y Galindo, 2009). De igual forma, también han cobrado gran importancia los estudios relacionados con la identificación de los factores determinantes que explican la dinámica o evolución de

las emisiones de CO₂ generadas por el uso de energía (McKibbin et al., 2005; Galindo y Aroche, 2009; Arouri et al., 2012).

Uno de los primeros modelos que se utilizaron para explicar los factores determinantes de los impactos ambientales fue propuesto por Ehrlich y Holdren (1972a), conocido como IPAT. El modelo propone que los impactos ambientales (I=Impact) se explican por el producto de tres factores: población (P=Population), la actividad económica (A=Affluence), y la tecnología (T= Technology) (Ehrlich & Holdren, 1972b). A través de los años, este modelo se ha utilizado para explicar la dinámica de las emisiones de CO₂, al aplicarse a diferentes escalas espaciales y temporales (Dietz y Rosa, 1997; York et al., 2002; Zilio, 2008; Alcántara, 2009; Song et al., 2011; Yue et al., 2013).

Una de las variantes del modelo IPAT que frecuentemente ha sido utilizada es la ecuación de Kaya, que corresponde a una aplicación específica para explicar las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustible. Según la ecuación de Kaya, las emisiones nacionales de CO₂ se descomponen en el producto de cuatro factores determinantes: el índice de carbonización, la intensidad energética, el PIB *per cápita*, y el tamaño de la población (Kaya, 1990 citado en Metz et al., 2007).

La ecuación de Kaya ha sido aplicada para explicar y comparar los factores determinantes que impulsan las emisiones de CO₂ en diferentes áreas del mundo (Alcántara y Padilla, 2005; Li y Ou, 2013; Rivas et al., 2013). Asimismo, se han realizado análisis con base en esta ecuación, pero integrando índices para explorar las desigualdades en las emisiones de CO₂ entre distintos países y para analizar el impacto de acciones de reducción previamente aplicadas (O'Mahony, 2013; Duro y Padilla, 2006).

Samaniego y Galindo (2009 y 2010) aplicaron la ecuación de Kaya para analizar el efecto de los factores determinantes en las emisiones de CO₂ asociadas al uso de combustibles fósiles y la producción de cemento en los países de América Latina y

el Caribe (ALC). Concluyeron que para el periodo 1990-2005, la tasa anual promedio de crecimiento de las emisiones de CO₂ en ALC fue de 2,6%, pero enfatizan diferencias significativas entre los países. El estudio muestra la dependencia del crecimiento económico de ALC sobre el consumo de energía, lo que podría ser un factor limitante para establecer acuerdos comunes sobre la reducción de las emisiones.

Baumert y Pershing (2004) señalan que el nivel de la intensidad energética de un país puede ser el reflejo de su estructura económica. Por esto, es de gran importancia analizar la dinámica de los distintos sectores que contribuyen de forma importante en la economía de una región. Por ejemplo, el sector manufacturero de San Luis Potosí ha sido el principal contribuyente del PIB estatal, con una participación de 25,83% anual, promediado entre 1995-2010 (INEGI, 2000, 2004, 2010). A su vez, de los subsectores que componen dicho sector, los más importantes en orden por su mayor contribución al PIB del sector, son: fabricación de maquinaria y equipo, industria alimentaria, industrias metálicas básicas, y productos minerales no metálicos; que de manera conjunta contribuyen con el 90% del PIB manufacturero estatal.

La dinámica del sector manufacturero de San Luis Potosí ha impactado también en materia ambiental. Las emisiones de GEI de este sector durante el periodo 2000- 2006 fueron de las más contribuyentes a nivel estatal al alcanzar 39 985 755 toneladas, de las cuales el 68% corresponden a las emisiones derivadas por el uso de combustibles y el restante 32% a las generadas en los procesos de transformación de las materias primas, que son las emisiones no energéticas en los procesos industriales de transformación. Dado el contexto anterior, el objetivo del presente estudio es aplicar la ecuación de Kaya para analizar el efecto que cada uno de los factores impulsores ejerce sobre la variación interanual de las emisiones de CO₂ generadas por el consumo de combustible en el sector industrial manufacturero de San Luis Potosí, durante el periodo 2000-2012.

4.2 Metodología

La metodología utilizada para analizar la variación de las emisiones de CO₂ se sustentó en el análisis de la ecuación de Kaya, la cual sugiere que las emisiones se pueden descomponer en cuatro factores determinantes:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{PIB} \cdot \frac{PIB}{P} \cdot P \quad (1)$$

donde: CO_2/E es la intensidad de carbonización de la energía o índice de carbonización, que son las emisiones de CO₂ generadas en el sector manufacturero en función de la energía (E) consumida por el uso de combustibles en el sector (toneladas de CO₂ por cada barril equivalente de petróleo, BEP); E/PIB representa la intensidad energética en función de la renta económica, en este caso es la cantidad de energía requerida para producir mil unidades del PIB del sector manufacturero (BEP por cada 1000 pesos de PIB); PIB/P , es la renta económica *per cápita* del sector (miles de pesos por habitante); y P es la población (número de habitantes en el estado).

La ecuación (1) se puede reescribir como:

$$C = c \cdot e \cdot r \cdot P \quad (2)$$

Donde C = emisiones de CO₂, c = intensidad de carbonización de la energía, e = intensidad energética, r = renta económica *per cápita* del sector, y P = población.

La descomposición de los factores de la ecuación se realizó con la técnica de análisis de descomposición de índices (Decomposition Index Analysis, IDA), la cual permite separar los componentes de una determinada ecuación con el fin de analizar en qué medida la variación de estos componentes contribuye con el cambio en el indicador de estudio (Fernández, 2012). La descomposición de una variable

en efectos explicativos es similar al problema de los números índices en economía; y en años recientes se ha sido utilizado, bajo distintos enfoques, en problemas relacionados con energía y emisiones de CO₂ (Alcántara y Padilla, 2005; Feng et al., 2009).

A partir de la expresión (2) se puede establecer que el cambio en las emisiones de CO₂ en un periodo T (ΔC_T) se descompone por el efecto de la variación de cuatro factores; a saber, el efecto de la variación de la intensidad de carbonización (ΔC_c), el de la intensidad energética (ΔC_e), el efecto del PIB *per cápita* (ΔC_r), y el del tamaño de la población (ΔC_p) Por lo tanto, la variación de las emisiones de un año base (0) a un año objetivo (T), puede expresarse como:

$$\Delta C_T = C_T - C_0 = \Delta C_c + \Delta C_e + \Delta C_r + \Delta C_p \quad (3)$$

Debido a que el interés se centra en la tasa de cambio de las emisiones a través del tiempo, se considera la derivación de los logaritmos de la expresión (2):

$$\frac{d \ln C}{dt} = \frac{d \ln c}{dt} + \frac{d \ln e}{dt} + \frac{d \ln r}{dt} + \frac{d \ln P}{dt} \quad (4)$$

Finalmente, al integrar la ecuación (4) para un intervalo entre 0 y T (para este estudio un año), y siguiendo la propuesta de Ang y Choi (1997), la forma aditiva para descomponer los efectos de cada factor en la variación de las emisiones está dada por:

$$\Delta C_T = L(C_T, C_0) \ln \frac{c_T}{c_0} + L(C_T, C_0) \ln \frac{e_T}{e_0} + L(C_T, C_0) \ln \frac{r_T}{r_0} + L(C_T, C_0) \ln \frac{P_T}{P_0} \quad (5)$$

Donde:

$$L(C_T, C_0) = \frac{C_T - C_0}{\ln C_T - \ln C_0} \quad (6)$$

Corresponde a la media logarítmica de C_T y C_0 , que proporciona una descomposición aditiva exacta. Cada uno de los términos de la ecuación (5) describe el efecto (emisiones), con el cual contribuye cada factor determinante en el total de la variación de las emisiones del periodo a evaluar (ΔC_c , ΔC_e , ΔC_r , ΔC_p).

Los datos relativos a las emisiones de CO₂ y los de energía consumida se tomaron del inventario de emisiones de GEI del sector industrial en San Luis Potosí, elaborado por la autora del presente estudio. Los datos del PIB del sector manufacturero a precios constantes del 2008 se tomaron del Banco de Información Económica del INEGI, y los datos de población se obtuvieron del INEGI.

4.3 Resultados

Una vez que se obtuvieron los valores de cada uno de los factores, se hicieron los cálculos de la expresión (5) para cada año del periodo en estudio. En términos generales, la dinámica de la variación interanual total de las emisiones de CO₂ reflejó la contribución cambiante de cada uno de los factores del modelo (Tabla 4.1).

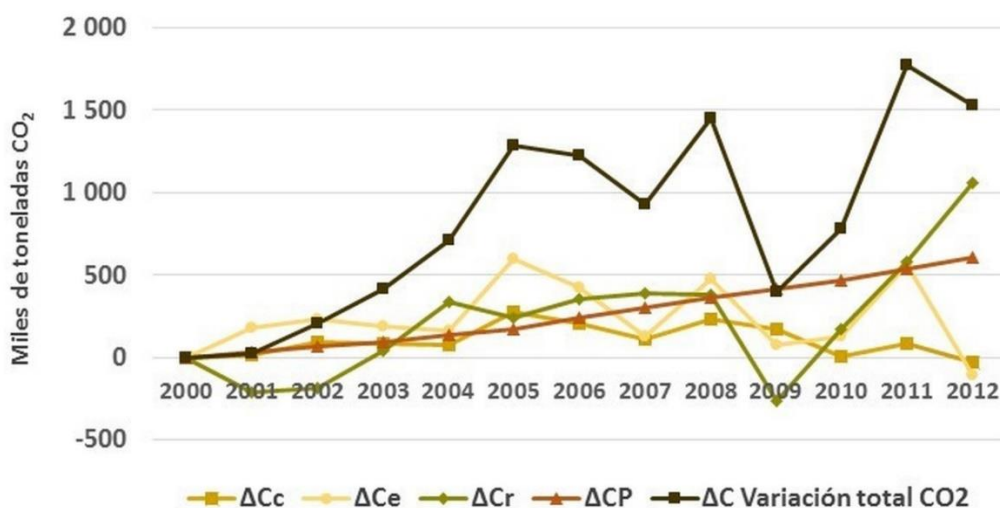
En la variación total acumulada se distingue el efecto que impusieron los factores de la intensidad energética y el PIB manufacturero *per cápita* sobre el patrón de comportamiento observado en la mayoría del periodo (Gráfica 4.1).

A continuación analizaremos con más detalle el efecto de cada factor del modelo:

1. En general, la intensidad de carbonización de la energía presentó poco efecto sobre la variación interanual de las emisiones, pero hay algunos periodos como el 2001-2002, 2004-2005, y 2009-2010, cuyas contribuciones correspondientes del 38,58%, 34,50%, y – 43,06% fueron importantes.

Tabla 4.1. Contribución de los factores determinantes en la variación interanual de las emisiones de CO₂ por el uso de combustible en el sector manufacturero de San Luis Potosí, durante el periodo 2000-2012.

Periodo	Variación total anual		Contribución de cada factor en la variación anual de las emisiones (miles de toneladas de CO ₂ y porcentaje)							
	ΔC	%	ΔC_c	%	ΔC_e	%	ΔC_r	%	ΔC_p	%
2000-2001	20 241	100	17 772	87,80	180 938	893,92	-209 956	-1 037,28	31 488	155,56
2001-2002	188 046	100	72 544	38,58	55 037	29,27	28 293	15,05	32 171	17,11
2002-2003	208 228	100	-2 944	-1,41	-46 424	-22,29	223 862	107,51	33 734	16,20
2003-2004	295 536	100	-7 838	-2,65	-26 654	-9,02	294 264	99,57	35 765	12,10
2004-2005	574 128	100	198 080	34,50	434 325	75,65	-97 695	-17,02	39 418	6,87
2005-2006	-62 872	100	-71 758	114,14	-169 093	268,95	112 781	-179,38	65 199	-103,70
2006-2007	-294 829	100	-92 573	31,40	-298 993	101,41	35 033	-11,88	61 704	-20,93
2007-2008	521 657	100	120 071	23,02	347 850	66,68	-8 646	-1,66	62 383	11,96
2008-2009	-1 047 750	100	-62 791	5,99	-401 651	38,33	-640 958	61,17	57 651	-5,50
2009-2010	381 975	100	-164 486	-43,06	56 500	14,79	437 380	114,50	52 581	13,77
2010-2011	991 534	100	82 110	8,28	434 025	43,77	411 022	41,45	64 376	6,49
2011-2012	-248 250	100	-120 243	48,44	-671 042	270,31	472 807	-190,46	70 228	-28,29



Gráfica 4.1. Variación acumulada de las emisiones de CO₂ por factores determinantes.

Para analizar la causa de los efectos más significativos de la intensidad de carbonización es necesario analizar los cambios en las variables que la componen. Por ejemplo, para el efecto que experimentó entre 2004-2005, se detectó que la tasa anual de variación (TAV) de la energía consumida en el sector fue del 9,23%, pero las emisiones de CO₂ aumentaron un 14,43%, lo cual generó un incremento

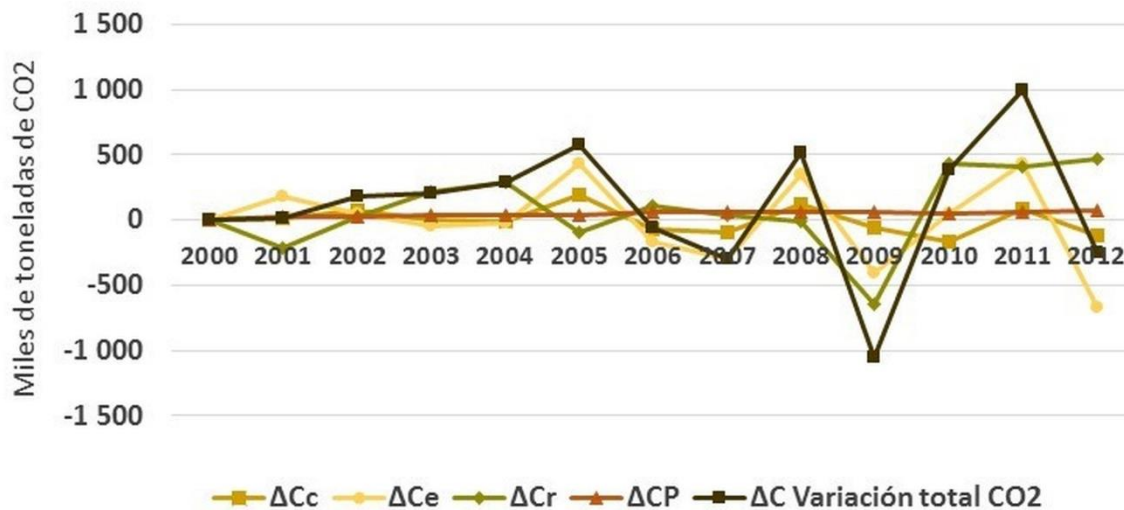
del 4,76% en la intensidad de carbonización (Tabla 4.2); que se reflejó de forma negativa al contribuir con 198 080 toneladas en la variación de las emisiones entre 2004-2005 (Tabla 4.1).

Tabla 4.2. Cambios observados en el factor de la intensidad de carbonización de la energía entre 2004-2005.

Año	ton CO ₂	TAV CO ₂	*BEP	TAV BEP	**c = CO ₂ /BEP	TAV c
2004	3 977 376		9 442 819		0,4212	
2005	4 551 504	14,43	10 314 702	9,23	0,4413	4,76

*Barriles equivalentes de petróleo. **Intensidad de carbonización de la energía.

2. El factor determinante de la intensidad energética mostró un efecto significativo en la variación interanual de las emisiones, especialmente en el periodo 2004-2008 y 2010-2012 (Gráfica 4.2). De hecho, existen episodios como 2005-2006 y 2006-2007 en los que el efecto de este factor contribuyó de forma positiva, al dejar de emitir 169 063 y 298 993 toneladas respectivamente.



Gráfica 4.2. Dinámica de la contribución de cada factor en la variación interanual de las emisiones de CO₂ por el uso de combustible en el sector manufacturero de San Luis Potosí.

3. Por otra parte, el efecto del factor del PIB manufacturero *per cápita* reflejó una dinámica variable en su contribución en la variación de las emisiones, con efectos interanuales importantes en los periodos 2002-2004 y 2008-2011. Aunque este factor se relaciona con el de la intensidad energética (energía/PIB), se presentaron episodios como el 2002-2004, en los que el incremento del PIB no impactó de la misma forma en la variación de ambos factores.

4. Finalmente, el efecto del tamaño de población no parece significativa, puesto que este factor mantiene un crecimiento con una variación constantemente positiva, desacoplada de los cambios observados en la variación interanual de las emisiones.

4.4. Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que la estructura económica de un sector impacta sobre los niveles de su intensidad energética, lo cual coincide con lo argumentado por Baumert y Pershing (2004). Como se observó en nuestro estudio, la intensidad energética reflejó un efecto importante en la variación de las emisiones entre 2004-2005 y 2007-2008, como consecuencia de un incremento en el PIB total del sector, pero con un incremento más pronunciado en la energía consumida. Como ejemplo, en el periodo 2004-2005 el factor de la intensidad energética resultó ser el más contribuyente al participar con el 75,65% de la variación anual total de las emisiones (Tabla 4.1). Esta contribución fue el resultado del cambio experimentado por la intensidad energética, que se incrementó de 0,1772 a 0,1962 BEP/PIB, como consecuencia de un desacoplamiento entre la tasa de variación de la energía y la del PIB; la TAV del consumo total de energía del sector fue 9,23%, pero la del PIB fue del - 1,36% (Tabla 4.3).

De igual manera, entre el 2007-2008, la intensidad energética experimentó un comportamiento similar al del 2004-2005, dejando de manifiesto con esto que un crecimiento en la demanda de energía del sector no siempre es el reflejo de un

incremento en el PIB; esto es, la intensidad energética depende, en gran medida, de la dinámica de los subsectores más intensos en la demanda de energía, pero que no son los más contribuyentes en el PIB del sector.

Tabla 4.3. Variación en los componentes de la intensidad energética en el periodo 2004-2005.

Año	BEP	TAV BEP	PIB	TAV PIB	*e = BEP/PIB	TAV e
2004	9 442 819		53 296 322		0,1772	
2005	10 314 702	9,23	52 571 847	-1,36	0,1962	10,74

*Intensidad energética.

En una economía en crecimiento es común observar que las emisiones aumenten de acuerdo con el PIB, debido a que un mayor crecimiento económico requiere mayor demanda de energía; sin embargo, es posible un crecimiento del PIB junto a una reducción en la intensidad de carbonización, debido a que la estructura económica dentro de un sector económico incide sobre las emisiones de CO₂, lo cual coincide con lo demostrado por Galindo y Samaniego (2010). Por ejemplo, el factor de la intensidad de carbonización de la energía contribuyó con una tasa significativa del - 43,06%, que evita la emisión de 164 486 toneladas en el 2010, debido a que la energía consumida en el sector se incrementó a una tasa del 17,66%, mientras las emisiones lo hicieron a un 12,22% (Tabla 4.4); este desacoplamiento entre emisiones y energía se debió al crecimiento de subsectores en los cuales predomina el uso de combustibles de baja carbonización.

Tabla 4.4. Cambios en los componentes de la intensidad de carbonización de la energía en el periodo 2009-2010.

Año	ton CO ₂	TAV CO ₂	BEP	TAV BEP	c = CO ₂ /BEP	TAV c
2009	3 666 321		8 520 311		0,4303	
2010	4 114 432	12,22	10 025 127	17,66	0,4104	-4,62

4.5 Conclusiones

Los factores de la intensidad energética y el PIB *per cápita* contribuyeron de forma importante sobre la variación interanual de las emisiones; y el efecto de estos factores determinantes reflejó la dinámica de los subsectores más demandantes en energía, y que utilizan combustibles intensos en carbonización; independientemente de la contribución de estos subsectores en el PIB del sector manufacturero.

Por otra parte, la intensidad de carbonización de la energía contribuyó en menor grado que los factores anteriores, pero de forma importante en algunos años. Cabe señalar los periodos como el 2006-2007 y 2009-2010, en los que se experimentó una reducción de emisiones por el efecto del factor de intensidad de carbonización, a pesar de una mayor demanda energética. Estos episodios muestran la posibilidad de una reducción de emisiones ante un incremento en la energía requerida por los procesos industriales, cuestión que debe considerarse en el planteamiento de posibles estrategias de mitigación de emisiones de GEI.

Es importante señalar que la intensidad energética y el PIB manufacturero *per cápita* fueron los factores que reflejaron un mayor efecto sobre la variación de las emisiones de CO₂ del sector manufacturero de San Luis Potosí, y que el tamaño de la población no reflejó un efecto significativo; por lo tanto, es posible prescindir de este último factor en la ecuación de Kaya al analizar los factores determinantes en las emisiones industriales de CO₂; por lo que se recomienda hacer un análisis que considere solo el efecto de los tres primeros factores del modelo.

4.6 Referencias

Alcántara Escolano, V. (2009). Consumo energético y emisiones de CO₂ en la industria española. *Economía Industrial*(371), 49-57.

Alcántara Escolano, V. y Padilla Rosa, E. (2005). Análisis de las emisiones de CO₂ y sus factores explicativos en las diferentes áreas del mundo. *Revista de Economía Crítica*(4), 17-37.

Alcántara Escolano, V. y Padilla Rosa, E. (2010). Determinantes del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2007). *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1-15.

Alcántara, V. y López, S. (1996). "Sobre los factores explicativos del incremento del consumo mundial de energía". En F. La Roca, y A. Sánchez, *Economía crítica. Trabajo y medio ambiente* (págs. 231-240). Valencia, España: Universidad de Valencia.

Alves, M. y Moutinho, V. (2013). *Decomposition analysis for energy-related CO₂ emissions intensity over 1996-2009 in Portuguese Industrial Sectors*. University of Aveiro, Campus de Santiago. Aveiro, Portugal.

AMBIENTAL POCH. (2008). *Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero*. Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. Santiago, Chile.

AMBIENTAL, P. (2008). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. Santiago, Chile.

ANC. (2011). *Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2002-2011*. Asociación Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. México, D. F.

Ang, B. W. (1999). Decomposition methodology in energy demand and environmental analysis. En J. C. vanden den Bergh, *Handbook of environmental and Resource Economies* (págs. 1146-1163). Edward Elgar Publishing Inc.

Ang, B. W. y Choi, K. H. (1997). Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method. *Energy Journal*, 18(3), 59-73.

Ang, B. W. y Choi, K. H. (1997). Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method. *Energy Journal*, 18(3), 59-73.

Angelino, M. I. (2009). *Factores determinantes de los niveles de emisiones de CO₂ en países del cono sur de América Latina*. Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de Economía Política.

Arouri, E., Youssef, A., M'henni, H. y Rault, C. (2012). Energy consumption, economic growth and CO₂ emissions in Middle East and North African countries. *Energy Policy*, 45, 342-349.

Banco, m. (s. f.). *Crecimiento del PIB (%)*. Recuperado el 10 de Junio de 2014, de <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG/countries?page=6&display=default>.

Baumert, K. y Pershing, J. (2004). *Climate Data: Insights and Observations*. Pew Center on Global Climate Change. Arlington, VA, USA.

Blanch, J. J. (2004). *Posibles escenarios futuros mundiales de emisiones y absorciones de CO₂ y cumplimiento de los acuerdos de Kyoto*. Barcelona: Tesis doctoral en la Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Mecànica de Fluids.

Bonilla Cárdenasa, J. A. y Lemus Flores, C. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencia Pecuaria*(3), 215-246.

Boyd, G. A., McDonald, J. F., Ross, M. y Hanson, D. A. (1987). Separating the changing composition of US manufacturing production from energy efficiency improvement: a Divisia index approach. *Energy Journal*, 8(2), 77-96.

CANACEM. (2013). *Producción de cemento 2000-2012*. Cámara Nacional del Cemento. Recuperado el 14 de Agosto de 2012, de http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm.

CEADS. (2013). *Escenarios de Emisión de Gases de Efceto Invernadero Argentina 2012*. Consejo Empresario Argentino para el Desarrollo Sostenible. Buenos Aires, Argentina.

CEMEX. (2012). *El Manual del Constructor*. México, D. F.

CEPAL-ONU. (2010). *La economía del cambio climático en Centroamérica. Síntesis 2010*. México, D. F.

Chen, K., Yang, H., Ma, Z., Bi, Y. y Huang, L. (2013). Influence of temperature to the short-term effects of various ozone metrics on daily mortality in Suzhou, China. *Atmospheric Environment*(79), 119-128.

Chen, L., Yang, Z. y Chen, B. (2013). Decomposition Analysis of Energy-Related Industrial CO₂ Emissions in China. *Energies*. doi:10.3390/en6052319

Chen, R., Pan, G., Zhang, Y., Xu, Q., Zeng, G., Xu, X., . . . Kan, H. (2011). Ambient carbon monoxide and daily mortality in three Chinese cities: The China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES). *Science of the Total Environment*(409), 4923-4928.

CONAMA. (2009). *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile.

Diakoulaki, D. y Mandaraka, M. (2007). Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO₂ emissions in the EU manufacturing sector. *Energy Economics*, 29(4), 636–664.

Dietz, T. y Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 94(1), 175-179.

Dlugokencky, E. J., Nisbet, E. G., Fisher, R. y Lowry, D. (2011). Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*(369), 2058–2072.

Duro Moreno, J. y Padilla Rosa, E. (2006). *Análisis de los factores determinantes de las desigualdades internacionales en las emisiones de CO₂ per cápita aplicando el enfoque distributivo: una metodología de descomposición por factores de Kaya*. Barcelona, España.

Ehrlich, P. y Holdren, J. (1972a). Impact of population growth. (R. G. Riker, Ed.) *Population, Resources and the Environment*, 365-377.

Ehrlich, P. y Holdren, J. (1972b). A bulletin dialogue on the ;Closing Circle: Critique: One dimensional ecology. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 28(5), 16-27.

Etheridge , D. M., Steele, L. P., Francey, R. J., Barnola, J. M., Morgan, V. I. y Langfelds, R. L. (1996). Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Geophysic*, 4115-4128.

Feng, K., Hubacek, K. y Guan, D. (2009). Lifestyles, technology and CO₂ emissions in China: A regional comparative analysis. *Ecological Economics*, 69, 145–154.

Feng, K., Hubacek, K. y Guan, D. (2009). Lifestyles, technology and CO₂ emissions in China: A regional comparative analysis. *Ecological Economics*, 69, 145-154.

Fernández González, P. (2012). *Técnicas de descomposición de variaciones basadas en índices de Divisia. Algunas aplicaciones medioambientales*. (Tesis inédita de doctorado). Universidad de Oviedo, Principado de Asturias, España.

Funk, T. H., Chinkin, L. R., Roberts, P. T., Saeger, M., Mulligan, S., Páramo, V. H. y Yarbrough, J. (2001). Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *The Science of the Total Environment*(276), 135-151.

Galán Madruga, D. y Fernández Patier, R. (2006). Implicación de los NO_x en la Química Atmosférica. *M+A. Revista Electrónica de Medio Ambiente*(2), 90-103.

Galindo, L. M. y Aroche, F. (2009). *Cambio climático y fundamentos económicos. El caso México*. Estudio elaborado para el Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.

Galindo, L. M. y Samaniego, J. L. (2010). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados. *Revista CEPAL*(100), 69-96.

IEH. (2010). *Proceedings of the 2010 Annual UK Review Meeting on Outdoor and Indoor Air Pollution Research, 13–14 April 2010 (Web Report W27)*. Institute of Environment and Health, Cranfield University, UK.

INEGI. (2000, 2004, 2010,). *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Méx.

INEGI. (2005). *Sistema de Cuentas Nacionales. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa 1999-2004*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Méx.

INEGI. (2005, 2008). *La industria siderúrgica en México 2011. Serie estadísticas sectoriales*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags.

IPCC. (2000). *Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones*. Informe especial del Grupo de trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., pp. 107.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley.

Lee, K. y Oh, W. (2006). Analysis of CO₂ emissions in APEC countries: A time-series and a cross-sectional decomposition using the log mean Divisia method. *Energy Policy*, 34(17), 2779–2787.

Lenton, T. M. y Vaughan, N. E. (2009). The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*(9), 5539-5561.

LGCC. (2012). Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación. *DOF 06-06-2012*.

Li, W. y Ou, Q.-X. (2013). Decomposition of China's Carbon Emissions Intensity from 1995 to 2010: An Extended Kaya Identity. Recuperado el 11 de Enero de 2014, de <http://dx.doi.org/10.1155/2013/973074>

Liu, L.-C., Fang, Y., Wu, G. y Wei, Y.-M. (2007). Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: An empirical analysis. *Energy Policy*, 35(11), 5892–5900.

McGraw, J., Haas, P., Young, L. y Evens, A. (2010). Greenhouse gas emissions in Chicago: Emissions inventories and reduction strategies for Chicago and its metropolitan region. *Journal of Great Lakes Research*, 36, 106-114.

McGraw, J., Hass, P., Young, L. y Evens, A. (2010). Greenhouse gas emissions in Chicago: Emissions inventories and reduction estrategias for Chicago and its metropolitan region. *Journal of Great Lakes Research*(36), 106-114.

McKibbin, Warwick J.; Stegman, Alison;. (2005). Convergence and per capita carbon emissions. *International Economy Program*, (págs. 1-76). Canberra, Australia.

Minambiente. (2009). *Manual de Evaluación del Programa de Inventario de Emisiones*. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia.

Monks, P. S., Carpenter, L. J., Penkett, S. A., Ayers, G. P., Gillette, R. W., Galbally, I. E. y Meyer, C. P. (1998). Fundamental Ozone Photochemistry in the remote marine boundary layer: the SOAPEX experiment, measurement and theory. *Atmospheric Environment*, 32(21), 3647-3664.

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., . . . Zurek, M. (2008). *Exploración de nuevos escenarios para el análisis de las emisiones del cambio climático, de sus impactos y de las estrategias de respuesta*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra.

Nelson, G. C., Bennett, E., Berhe, A. A., Cassman, K., DeFries, R., Dietz, T., . . . Zurek, M. (2006). Anthropogenic Drivers of Ecosystem Change: an Overview. *Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art29/> .*

O'Mahony, T. (2013). Decomposition of Ireland's Carbon Emissions From 1990-2010: an Extended Kaya Identity. *Energy Policy*, 59, 573-581.

Parra Z., R., Apaza M., G. y Agramont A., A. (2010). Estimación de factores de emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales. *Revista Boliviana de Química*, 27(2), 81-88.

Prather, M. J., Holmes, C. D. y Juno, H. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*(32), 1-5.

Rivas Wyzykowska, A., Ramoni Perazzi, J. y Orlandoni Merli,, G. (2013). Evaluación del impacto del crecimiento de la actividad humana en el medio ambiente: Identidad de Kaya aplicada a Venezuela (1990-2006). *Agroalimentaria*, 19(37), 127-145.

Sahu, S. y Narayanan, K. (2010). Decomposition of Industrial Energy Consumption in Indian Manufacturing: The Energy Intensity Approach. *"Frontier Issues in Technology, Development and Environment"*, (págs. 1-29). Mumbai, India.

Samaniego, J. L. y Galindo, L. M. (2009). Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a combustibles fósiles y cemento en América Latina. *Economía Informa*(360), 40-66.

Sandoval Garcia, E. R. (2013). Proyección sobre la energía eléctrica en México mediante la Identidad de Kaya. *Economía Informa*(380), 41-53.

Schlatter, T. W. (2009). *Atmospheric Composition and Vertical Structure*. Boulder, Colorado, USA. Recuperado el 12 de Mayo de 2014, de http://ruc.noaa.gov/AMB_Publications_bj/2009%20Schlatter_Atmospheric%20Composition%20and%20Vertical%20Structure_eae319MS-1.pdf

SDE. (2010). *Panorama Económico del Estado de San Luis Potosí Cuarto Trimestre 2010*. Secretaría de Desarrollo Económico. San Luis Potosí, Méx.

SEDECO. (2010). *Programas sectoriales 2010-2015. Eje 2 Economía competitiva y generadora de empleos*. Secretaría de desarrollo económico. Gobierno del estado de San Luis Potosí. San Luis Potosí.

SEMARNAT-INE. (2005). *Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones*. México, D. F.

SEMARNAT-INE. (2012). *México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México, D. F.: Grupo Communicare, S.C.

SEMARNAT-INECC. (2012). *México. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidad sobre el Cambio Climático*. México, D. F.

SEMARNAT-INECC. (2013). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas*. México, D. F.

Song, M., Wang, S., Yu, H., Yang, L. y Wu, J. (2011). To reduce energy consumption and to maintain rapid economic growth: Analysis of the condition in China based on expended IPAT model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 5129–5134.

Szép, T. S. (2013). Eight Methods for Decomposing the Aggregate Energy Intensity of the Economic Structure. *'Club of Economics in Miskolc'*, 9(1), 77-84.

Taghavi, M., Cautenet, S. y Arteta, J. (2005). Impact of a highly detailed emission inventory on modeling accuracy. *Journal of Atmospheric Research*(74), 65-88.

Tans, P. (2009). An accounting of the observed increase in oceanic and atmospheric CO₂ and an outlook for the future. *Oceanography*, 22(4), 26-35.

Tapia Granados, J. A., Edward , L. I. y Carpintero, O. (2012). Climate change and the world economy: short-run determinants of atmospheric CO₂. *Environmental Science and Policy*(21), 50-62.

USA-EPA. (2013). *Emission Inventory*. Recuperado el 15 de diciembre de 2013, de http://www.epa.gov/air/aqportal/management/emissions_inventory/.

US-EPA. (2007). *Emissions Factor Uncertainty Assessment*. NC, USA.

US-EPA. (s.f.). *Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Recuperado el 12 de Marzo de 2013 de: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>.

York, R., Rosa, E. A. y Dietz, T. (2002). Bridging Environmental Science with Environmental Policy: Plasticity of Population, Affluence, and Technology. *Social Science Quarterly*, 83(1), 18-34.

Yue, T., Long, R., Chen, H. y Zhao, X. (2013). The optimal CO₂ emissions reduction path in Jiangsu province: An expanded IPAT approach. *Applied Energy*, 112, 1510-1517.

Zhao, M., Tan, L., Zhang, M., Liu, Y. y Yu, L. (2010). Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method. *Energy*, 35(6), 2505–2510.

Zhao, Y., Nielsen, C. P. y McElroy, M. B. (2012). China's CO₂ emissions estimated from the bottom up: Recent trends, spatial distributions, and quantification of uncertainties. *Atmospheric Environment*, 59, 214-223.

Zilio, M. (2008). Emisiones de dióxido de carbono en América Latina. Un aporte al estudio del cambio. *Economía y Sociedad*, XIV(22), 133-161.

Capítulo 5. Escenarios de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustible en el sector industrial de San Luis Potosí

Resumen

La evolución de las emisiones de CO₂ del sector industrial depende de diversos factores enmarcados en una dinámica poco predecible, que depende de la particularidad económica del contexto que se analice. Construir escenarios basados en el análisis de los factores determinantes de estas emisiones brinda un panorama sobre sus proyecciones a futuro, cuestión de suma importancia en el establecimiento de metas de reducción. Considerando lo anterior, en el presente capítulo se aplicó la metodología LMDI para identificar el efecto que cada uno de los subsectores del sector manufacturero tiene sobre los factores determinantes de la identidad de Kaya en la variación anual de las emisiones de CO₂ e identificar los posibles escenarios de reducción con una visión al 2020 para proponer estrategias de mitigación con base en los subsectores más contribuyentes en las emisiones y en la variación interanual de las mismas.

5.1 Introducción

El uso de combustibles fósiles como fuente energética es uno de los impulsores más importantes en el incremento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, condición que ha intensificado el impacto del efecto invernadero en el calentamiento global que se ha experimentado en los últimos años (IPCC, 2013). Por esto, cada vez son más numerosos los estudios que analizan y describen los factores directos que determinan la relación entre las emisiones de CO₂ y la dinámica del uso de los combustibles fósiles.

El análisis de la dinámica de los factores determinantes en las emisiones de CO₂ es una tarea primordial para elaborar escenarios sobre las posibles emisiones futuras de GEI, lo cual es la base para la aplicación de estrategias que impacten de forma eficaz y precisa en las metas de reducción de CO₂. La asociación entre las emisiones y el crecimiento económico de cada país o región ha sido ampliamente estudiada (Alcántara y Padilla, 2005; Samaniego y Galindo, 2009; Tapia, Edward y Carpintero, 2012;); por ello, un aspecto de gran interés para los usuarios de escenarios es el desarrollo de escenarios socioeconómicos de escala regional o nacional que, siendo coherentes con los escenarios mundiales, reflejen también las particularidades de las condiciones locales. Esto es de especial importancia, ya que la adopción de opciones de adaptación y de mitigación a nivel nacional y regional ha cobrado gran interés (Moss et al., 2008).

Una de las fórmulas más utilizadas para identificar los factores determinantes de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de energía, ha sido la identidad de Kaya. Esta relación establece, en forma general, que las emisiones se explican por cuatro factores determinantes; a saber, el índice de carbonización, la intensidad energética en términos del PIB, el PIB per cápita y el tamaño de la población de cada país (Kaya, 1990 citado en Metz et al., 2007). Comúnmente esta herramienta se utiliza para analizar los efectos que cada factor determinante tiene sobre las emisiones de un país o para comparar la dinámica de estos factores entre varios países (Duro y Padilla, 2006; Li y Ou, 2013; Rivas, Ramoni y Orlandoni, 2013).

Para analizar y comprender los cambios temporales experimentados por algunos indicadores medioambientales, es necesario identificar y evaluar la dinámica que ejercen los diferentes sectores que contribuyen de forma importante en los factores económicos que determinan dichos cambios. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ por el uso de combustibles fósiles en el sector industrial están estrechamente relacionados con la actividad productiva, de forma más específica con la estructura

de las diversas categorías o subsectores que componen el sector, así como por la matriz energética utilizada en las mismas.

Existen diversas técnicas que permiten separar los componentes de una determinada identidad con el fin de analizar en qué medida la variación de estos componentes contribuye con el cambio en el indicador de estudio, entre las que se encuentra la metodología LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index). El enfoque LMDI: ha sido ampliamente utilizado en los últimos años para analizar los cambios en las emisiones de CO₂ generadas en distintos ámbitos o sectores, debido a que permite una descomposición exacta de la contribución ponderada que cada sector puede ejercer sobre los factores que impactan en la variación de las emisiones (Lee y Oh, 2006; Liu, Fang, Wu y Wei, 2007).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es aplicar la metodología LMDI a la identidad de Kaya para evaluar el efecto que cada uno de los subsectores del sector industrial ejerce en los factores determinantes de la variación temporal de las emisiones; y con base en los resultados, construir los posibles escenarios de CO₂ proyectados al 2020, y detectar aquéllos que representan un potencial de mitigación para proponer estrategias de reducción pertinentes.

5.2 Antecedentes

Los impulsores del cambio climático obedecen tanto a procesos naturales como antropogénicos, que alteran el balance energético de la Tierra (Nelson et al., 2006). Los cambios en los flujos de energía provocados por los cambios experimentados en dichos impulsores se cuantifican a través del forzamiento radiativo (RF, por sus siglas en inglés); es decir, su influencia o impacto en el balance de la radiación terrestre, y en caso de que dicho RF sea positivo, inducirá a un calentamiento en la superficie de la tierra, en caso contrario, provocará un enfriamiento (Lenton y Vaughan, 2009).

Actualmente, el RF total es positivo, generando que el sistema climático absorba la energía acumulada; y la mayor contribución en este RF positivo se debe al incremento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) directos, que en forma conjunta y bien mezclados proporcionan un forzamiento de $2,83 \text{ W/m}^2$, siendo el dióxido de carbono (CO_2) el más contribuyente, al proporcionar un forzamiento de $1,69 \text{ W/m}^2$ (IPCC, 2013).

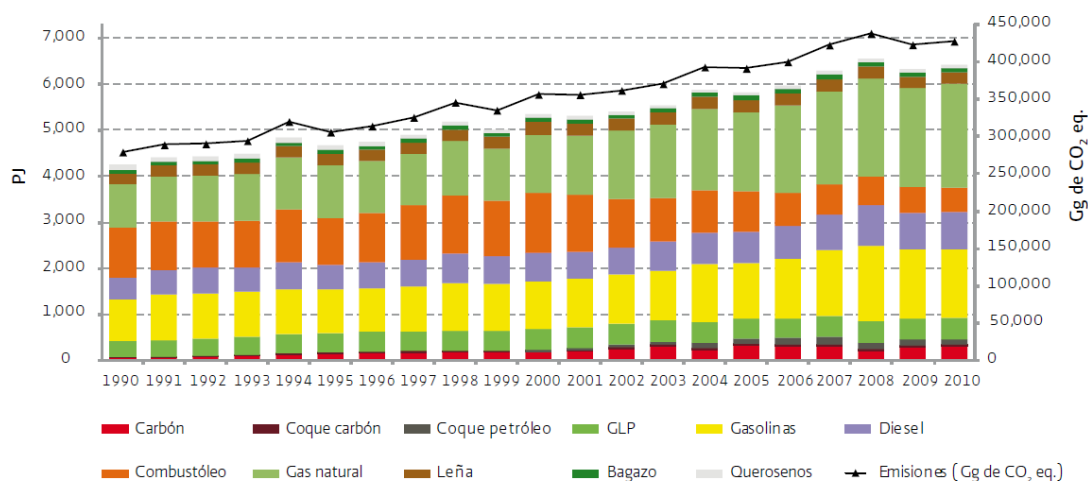
La concentración de dióxido de carbono se ha incrementado en un 40% desde la era preindustrial debido, en primer lugar, a las emisiones derivadas de las actividades humanas tales como la generación de electricidad, los procesos industriales y el transporte, cuyo componente común es el uso de combustibles fósiles; y en segundo lugar por el cambio de uso del suelo (IPCC, 2013). Las emisiones mundiales anuales de CO_2 derivadas del uso de combustibles fósiles y la producción de cemento fueron 8.3 (7.6 a 9.9) Giga toneladas (Ggt), promediadas entre 2002–2011, esto es el 54% por encima del nivel de 1990.

Los factores determinantes de las emisiones de CO_2

La relación directa entre el uso de combustibles fósiles y la liberación de emisiones de CO_2 a la atmósfera ha sido bien fundamentada. En la gran mayoría de los inventarios de emisiones nacionales de GEI se describe la relación de éstas con el consumo de combustibles fósiles en unidades de energía (Gráfica 5.1) (AMBIENTAL, 2008; SEMARNAT-INECC, 2012). Aunque esta relación ha sido explicada en varios estudios, cabe señalar que un factor importante que impacta en las emisiones es la composición de la matriz energética de cada país o sector.

En las últimas décadas han cobrado gran importancia los estudios relacionados con la identificación de los factores determinantes que explican la dinámica o evolución de las emisiones de CO_2 (McKibbin y Stegman, 2005; Galindo y Aroche, 2009; Arouri, Youssef, M'henni y Rault, 2012). Uno de los principales propósitos de llevar a cabo estos estudios es para construir los probables escenarios sobre las futuras

emisiones de este gas, con la finalidad de establecer metas pertinentes de reducción (Sandoval, 2013; CEADS, 2013).



Gráfica 5.1. Emisiones (Gg de CO₂ eq) asociadas al consumo de combustibles fósiles (PJ) en México (SEMARNAT-INECC 2012).

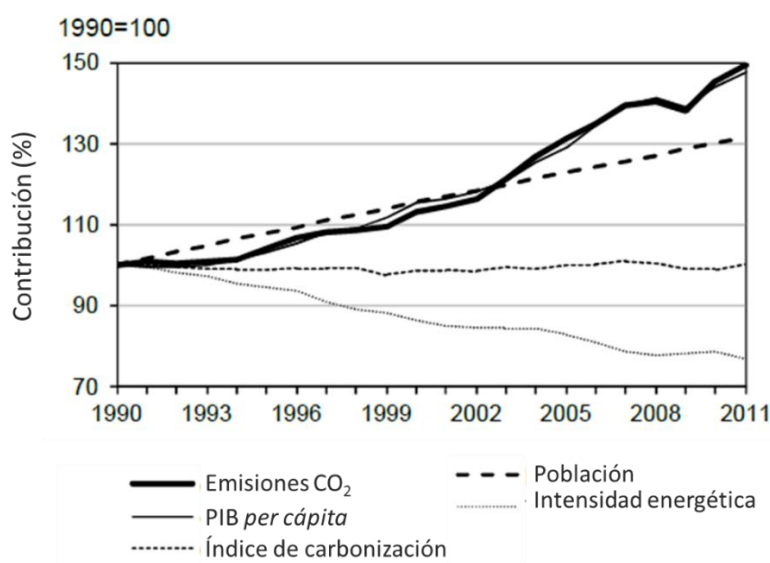
Uno de los primeros modelos que se utilizaron para explicar los factores determinantes de los impactos ambientales fue propuesto por Ehrlich y Holdren (1972a). Conocido como IPAT, el modelo propone que los impactos ambientales (I=Impact) se explican por el producto de tres factores: población (P=Population), la actividad económica (A=Affluence), y la tecnología (T=Technology) (Ehrlich & Holdren, 1972b). A través de los años, este modelo se ha utilizado para explicar la dinámica de las emisiones de CO₂ bajo algunas variantes en sus factores y para diferentes escalas espaciales y temporales (Alcantara, 2009; Song, Wang, Yu, Yang y Wu, 2011; Yue, Long, Chen y Zhao, 2013).

Una de las variantes del modelo IPAT que frecuentemente se utiliza es la identidad de Kaya, que principalmente se ha aplicado para explicar las emisiones energéticas de CO₂ (Kaya, 1990 citado en Metz et al., 2007). De acuerdo con esta identidad, las emisiones nacionales de CO₂ se descomponen en el producto de cuatro factores determinantes básicos: índice de carbonización o intensidad de carbonización de la

energía, intensidad energética, la renta económica en términos del PIB per cápita, y la población.

La identidad de Kaya ha sido utilizada en su forma original para analizar los factores determinantes que impulsan las emisiones de CO₂ (Alcántara Escolano & Padilla Rosa, 2005). También se ha usado bajo algunas variantes en sus factores, para explorar cuestiones relacionadas con las desigualdades en las emisiones de CO₂ de cada país o para analizar el impacto de acciones de reducción previamente aplicadas (Duro y Padilla, 2006; O'Mahony, 2013).

La Agencia Internacional de Energía (IEA) utilizó esta ecuación para evaluar la contribución relativa que tiene cada factor sobre las tendencias de las emisiones globales de CO₂ generadas por el uso de combustibles, durante el periodo 1990-2011 (Gráfica 5.2). El análisis muestra una dinámica parcialmente desacoplada entre el PIB *per cápita* y la intensidad energética; mientras que el primero refleja un crecimiento del 48% emparejado notoriamente con las emisiones, el segundo manifiesta un decremento del 23% durante el periodo de estudio (IEA, 2013).



Gráfica 5.2. Dinámica de las emisiones globales de CO₂, de acuerdo a los factores determinantes de la identidad de Kaya (IEA, 2013).

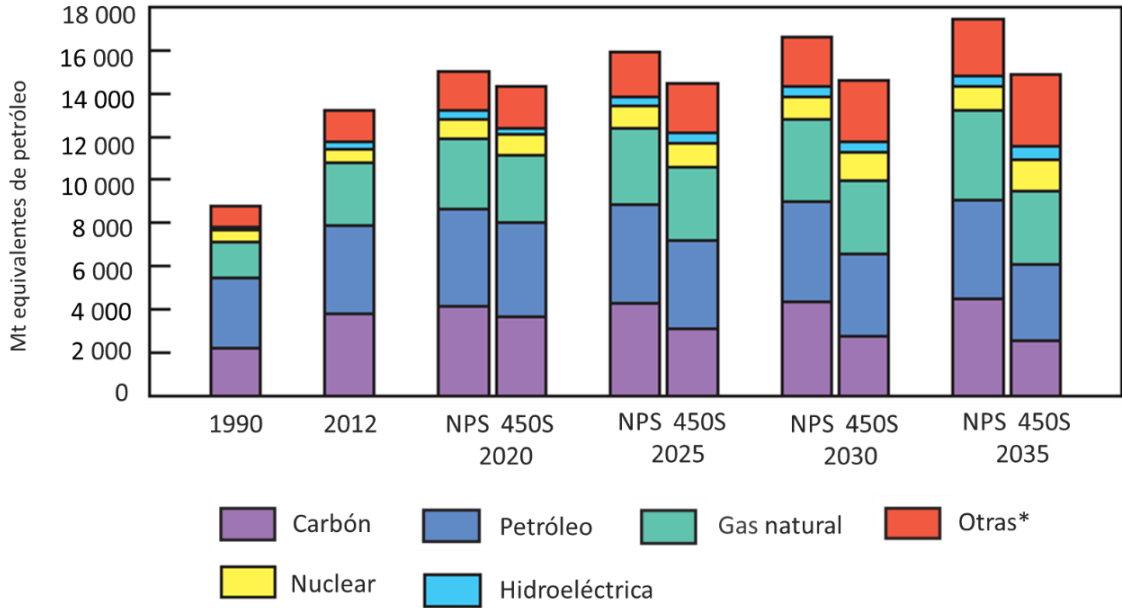
Los escenarios futuros de las emisiones de CO₂

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de sistemas dinámicos complejos que son determinados por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico. *Los escenarios de emisiones son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis* (IPCC, 2000, pp. 3).

Una de las relaciones causales que más se ha utilizado en la construcción de escenarios de emisiones de CO₂ vinculan las proyecciones de este gas con el crecimiento de las actividades económicas que imperan en la región que se estudie; sin embargo, es necesario un análisis desagregado de cada actividad para identificar el impacto de la composición y la dinámica de la matriz energética de cada sector productivo (Samaniego y Galindo, 2009; Chen, Yang y Chen, 2013).

En 1992 el IPCC publicó los primeros escenarios de emisiones globales de GEI, basados en cuatro líneas evolutivas que se construyeron tomando en cuenta los posibles cambios en las diversas fuerzas determinantes de las emisiones futuras; a saber, el cambio demográfico, el desarrollo social y económico, y la rapidez y dirección del cambio tecnológico (IPCC, 2000). En el quinto reporte del IPCC, los cuatro nuevos escenarios se denominan trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), que se distinguen por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750. Estos nuevos escenarios ofrecen un conjunto de datos sobre el cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, y especifican cuáles serán las concentraciones de GEI, así como las emisiones antropógenas anuales hasta el año 2100 (IPCC, 2013).

Por su parte, la IEA estimó las emisiones globales de CO₂ para el 2035, para lo cual consideró dos escenarios que incluyen acciones de mitigación sustentadas en cambios en la contribución de las diferentes fuentes de oferta de energía primaria (Gráfica 5.3). La proyección inicia en el 2013 hasta el 2035. Para el escenario con nuevas políticas (NPS, por sus siglas en inglés), las principales fuentes de energía continúan siendo los combustibles fósiles; mientras que para el 450S, que está construido bajo las políticas de reducción necesarias para cumplir con la meta de evitar un calentamiento mayor a los 2°C, las fuentes de energía renovables van sustituyendo al uso del carbón, y en menor grado al petróleo. Según el escenario NPS, las emisiones alcanzarán 37 242 Mt de CO₂; y bajo el 450S, estas mismas serán 21 568 Mt (IEA, 2014).



Gráfica 5.3. Escenarios de la oferta total de energía primaria por fuente de combustible (Modificado de IEA, 2014).

La relación de Kaya también se ha utilizado en la construcción de escenarios de las emisiones futuras de CO₂, aportando información importante sobre el efecto que

cada uno de los factores infiere sobre la variación de las emisiones a través del tiempo. (CEPAL-ONU, 2010; Sandoval, 2013).

Samaniego y Galindo (2009 y 2010) elaboraron diversos escenarios alternativos de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de energía y la producción de cemento en los países de América Latina y el Caribe (ALC), basados en los factores propuestos en la identidad de Kaya. Concluyeron que para el periodo 1990-2005, la tasa anual promedio de crecimiento de las emisiones de CO₂ en ALC fue de 2,6%, pero enfatizan diferencias significativas entre los países. El estudio muestra la dependencia del crecimiento económico de ALC sobre el consumo de energía, lo que podría ser un factor limitante para establecer acuerdos comunes sobre la reducción de emisiones de CO₂.

Para la elaboración de escenarios de emisiones es necesario analizar y comprender los cambios temporales experimentados por algunos indicadores económicos, medioambientales o sociales, que impactan en la dinámica de los factores determinantes de la variación de las emisiones. Existen diversas técnicas que permiten realizar la descomposición de la variación experimentada por un indicador, entre las que se encuentran los análisis econométricos, los análisis basados en índices (Index Decomposition Analysis, IDA) y los de análisis estructural (Structural Decomposition Analysis, SDA), entre otros (Fernández, 2012). Estas técnicas permiten separar los componentes de una determinada identidad con el fin de analizar en qué medida la variación de estos componentes contribuye con el cambio en el indicador de estudio.

El enfoque IDA permite realizar descomposiciones aditivas y multiplicativas, hace posible descomposiciones para cualquier tipo de agregado, y requiere menor información inicial. Dentro de los IDA se encuentran los métodos basados en Índices tipo Divisia y los Índices Laspeyres. Ambos se han utilizado con frecuencia para analizar indicadores relacionados con la demanda de energía, y en años más

recientes con las emisiones de CO₂ (Diakoulaki y Mandaraka, 2007; Sahu y Narayanan, 2010; Alves y Moutinho, 2013; Szép, 2013).

El enfoque tipo Divisia, como parte de los IDA, fué utilizado por primera vez por Boyd et al. (1987), y ha sido aplicado ampliamente en temas medioambientales; éste consiste en la suma ponderada de las tasas de crecimiento de los factores que determinan la variación de determinado indicador, donde cada ponderación corresponde con la contribución de cada factor en la variación del indicador. Alcántara y López (1996) propusieron la inclusión de la sectorización en la metodología de los índices tipo Divisia, de tal forma que posibilita la desagregación de cada factor en sus distintas categorías .

Ang y Choi (1997) aportaron el método de índice Divisia refinado, llamado posteriormente índice Divisia de media logaritmica (Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI), en el cual se obtiene una descomposición exacta de la contribución de los factores al introducir una nueva función de ponderación de tipo media logaritmica. Bajo este enfoque se subsanaron los inconvenientes que presentaban los enfoques anteriores, tales como los de grandes residuos en la descomposición, así como la imposibilidad de manejar valores de cero dentro de algunas categorías de los factores en estudio (Ang B. W., 1999).

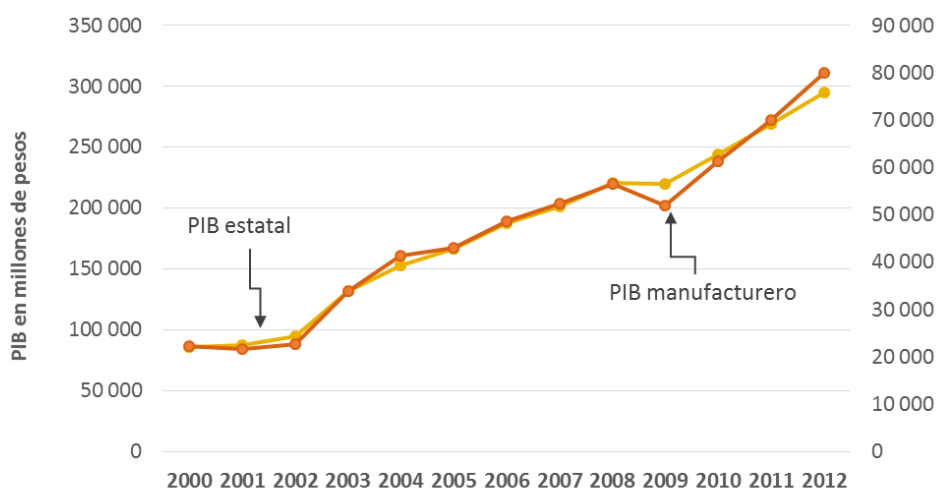
El método LMDI ha sido ampliamente utilizado en los últimos años para analizar los cambios en las emisiones de CO₂ generadas en distintos ámbitos o sectores. Lee y Oh (2006) utilizaron la metodología para separar los cambios de las emisiones generadas en los países pertenecientes al Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico, concluyendo que los factores más significativos en los cambios de las emisiones fueron el PIB *per cápita* y la población.

El LMDI se ha utilizado de forma extensiva para descomponer la contribución de los sectores industriales sobre la variación de las emisiones de CO₂ generadas en dicho sector. Por ejemplo, Liu et al. (2007) analizaron los cambios de las emisiones

generadas por 36 sectores industriales en China, concluyendo que los sectores de las materias primas químicas y productos químicos, productos minerales no metálicos, y la fundición y prensado de metales ferrosos explican el 59.31% de la variación de las emisiones. Por otro lado, Zhao et al. (2010) usaron también el LMDI y encontraron que el PIB del sector industrial es el principal factor determinante en las emisiones de dicho sector; además, concluyeron que la disminución de la intensidad energética, el ajuste de la energía y la estructura industrial son factores determinantes para la reducción de las emisiones. Como se ha visto, la dinámica de la estructura económica de una región puede ser un indicador sobre la demanda energética y como consecuencia de las emisiones de CO₂.

La aplicación del método LMDI para analizar la identidad de Kaya e identificar la contribución que las principales actividades productivas tienen sobre las emisiones resulta de gran utilidad para construir los posibles escenarios de las emisiones a mediano o largo plazo. Por esto, es importante identificar las actividades económicas predominantes en la región de estudio; por ejemplo, en San Luis Potosí, el sector manufacturero (industrial) ha sido el principal contribuyente del PIB estatal desde 1990, con una participación de al menos el 24% anual en los últimos veinte años, manifestando un mayor crecimiento en la última década (Gráfica 5.5).

El crecimiento económico que ha experimentado el sector manufacturero de San Luis Potosí en los últimos años se ha reflejado a nivel nacional, de tal manera que se ha convertido en la segunda entidad federativa de mayor crecimiento promedio en el PIB del sector manufacturero en los últimos diez años (Tabla 5.1); esto es de gran importancia para analizar el efecto de este crecimiento sobre la variación de las emisiones de CO₂ generadas en el sector.



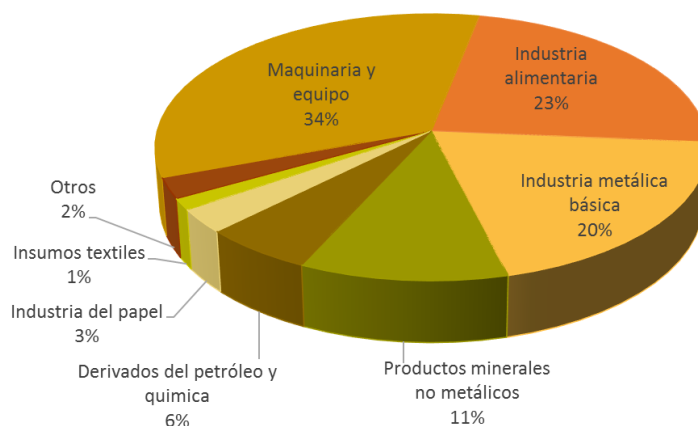
Gráfica 5.5. Comparación de la dinámica del Producto Interno Bruto estatal y del sector manufacturero de San Luis Potosí. (Elaboración propia con datos de SCN-INEGI 2000-2006, 2007-2011).

Tabla 5.1. Entidades federativas de mayor índice medio de variación en el PIB (base 2008) del sector manufacturero (2003-2012). Elaboración propia con datos de la BIE-INEGI, 2014.

Periodo	Índices de variación anual del PIB manufacturero				
	Nuevo león	San Luis Potosí	Coahuila	Querétaro	Puebla
2003-2004	1,062819	1,090047	1,056727	1,090209	0,963100
2004-2005	1,056932	0,986407	0,965042	1,030623	1,116961
2005-2006	1,066357	1,040162	1,024307	1,035519	1,025468
2006-2007	1,027382	1,022542	1,002522	1,045556	0,990345
2007-2008	1,008969	1,012150	0,989086	0,937654	1,032974
2008-2009	0,924442	0,869451	0,757941	0,903697	0,857795
2009-2010	1,152616	1,135507	1,361161	1,151044	1,127950
2010-2011	1,069724	1,109299	1,137922	1,092312	1,075959
2011-2012	1,047089	1,135024	1,079044	1,081410	1,091806
Promedio	1,046259	1,044510	1,041528	1,040892	1,031373

Por otra parte, es de gran utilidad analizar la dinámica de los diferentes subsectores que componen el sector manufacturero de San Luis Potosí, para determinar en forma desagregada el impacto de cada uno sobre los factores determinantes de las emisiones, y conocer su posible influencia sobre las futuras emisiones. Esto es importante, debido a que existen subsectores como el de maquinaria y equipo,

industria metálica básica y la industria alimentaria, que son los grandes contribuyentes en el PIB; y que, posiblemente, sean los de mayor efecto en la variación temporal de las emisiones (Gráfica 5.6).

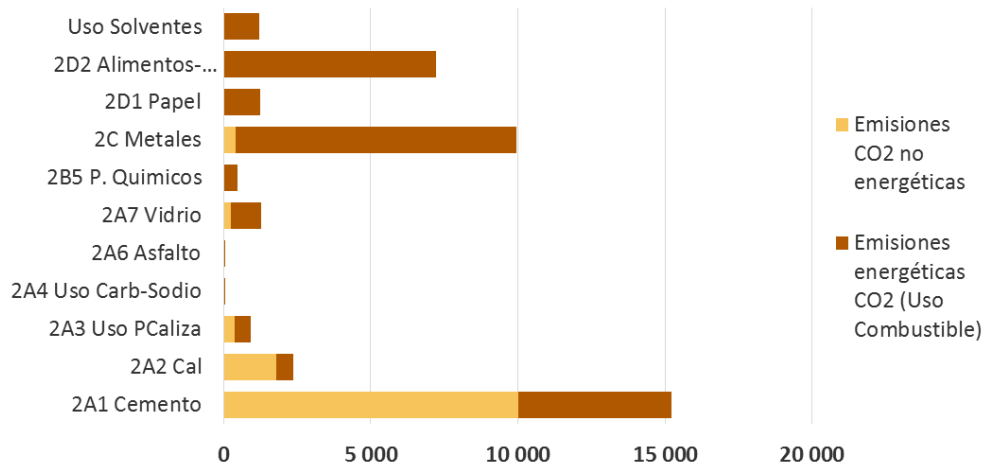


Gráfica 5.6. Contribución de cada subsector en el PIB del sector manufacturero de San Luis Potosí (promediados 2003-2012). Elaboración propia con datos de INEGI, 2014.

La dinámica del sector manufacturero de San Luis Potosí ha impactado también en materia ambiental. Las emisiones de GEI de este sector durante el periodo 2000- 2006 fueron de las más contribuyentes a nivel estatal al alcanzar 39 985 755 toneladas, dentro de las cuales el 68% corresponden a las emisiones derivadas por el uso de combustibles y el restante 32% a las generadas en los procesos de transformación de las materias primas, es decir las emisiones no energéticas en los procesos industriales (Gráfica 5.7).

Considerando la contribución del sector industrial de San Luis Potosí en las emisiones estatales de GEI, así como la importancia de conocer el impacto que la dinámica de cada uno de los forzantes puede inferir en las futuras emisiones de CO₂, el objetivo del presente estudio es aplicar el método LMDI a la identidad de Kaya para evaluar el efecto que cada uno de los subsectores del sector industrial ejerce en los factores determinantes de la variación temporal de las emisiones; y con base en los resultados, construir los posibles escenarios de CO₂ proyectados

al 2020 e identificar las condiciones de aquéllos que proporcionan una reducción en las emisiones.



Gráfica 5.7. Emisiones de CO₂ (miles de toneladas) del sector de Procesos Industriales en San Luis Potosí durante el periodo 2000-2006, según las categorías de las Guías del IPCC 1996.

5.3 Metodología

Para construir los escenarios de las emisiones de CO₂, primero se aplicó el LMDI como método de descomposición para determinar la contribución sectorizada que tiene cada uno de los factores de la identidad de Kaya sobre la variación anual de las emisiones. Con esto se analizó la evolución de las emisiones durante el periodo base 2000-2012, y a partir de ese periodo se indujeron cambios en los índices de variación de cada factor para proyectar sus correspondientes efectos sobre las emisiones al 2030. Se tiene entonces que la identidad de Kaya denota que las emisiones se pueden descomponer en cuatro factores:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{PIB} \cdot \frac{PIB}{P} \cdot P$$

Donde: CO_2/E corresponde al índice de carbonización, son las emisiones de CO_2 en función de la energía (E) utilizada para cubrir la demanda, por lo que también es llamada intensidad de carbonización de la energía; el factor E/PIB que representa la intensidad energética en función de la renta económica, esto es la cantidad de energía requerida para producir una unidad del PIB; el término PIB/P , que indica la renta económica *per cápita*; y P la población (Kaya, 1990 citado en Metz et al., 2007).

Los mismos autores del presente estudio aplicaron previamente esta identidad, concluyendo que la contribución del factor de la población sobre la variación de las emisiones del sector manufacturero resultó poco significativa, por lo que la relación se utilizó prescindiendo de este factor, de tal forma que la relación se aplicó como:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{PIB} \cdot PIB \quad (1)$$

Las emisiones anuales de CO_2 se estimaron en toneladas, la energía consumida por el uso de combustibles está dada en barriles equivalentes de petróleo (BEP), el PIB manufacturero corresponde a miles de pesos a precios del 2008.

La identidad (1) se puede reescribir como:

$$C = c \cdot e \cdot r \quad (2)$$

Donde C = emisiones de CO_2 , c = intensidad de carbonización de la energía, e = intensidad energética, r = renta económica (PIB).

La ecuación (2) implica que las emisiones de CO_2 en el sector manufacturero están vinculadas con la intensidad de carbonización de la energía, la intensidad energética y con el PIB del mismo sector.

Para analizar y comprender los cambios experimentados en las emisiones durante el periodo 2000-2012, se aplicó la metodología del LMDI para lograr una

descomposición sin residuos de cada uno de los componentes de la identidad de Kaya a un nivel desagregado por subsectores, con el fin de analizar en qué medida la variación de estos componentes contribuyó en los factores determinantes de la variación anual de las emisiones. Por consiguiente, la descomposición se aplicó para los distintos subsectores, por lo que la expresión (2) queda:

$$C = \sum_i^n C_i = \sum_i c_i e_i r_i \quad (3)$$

Donde i corresponde a cada uno de los subsectores que integran el sector manufacturero: 1, industria alimentaria; 2, industria del papel, impresión e industrias conexas; 3, industria química, del plástico y hule; 4, fabricación de productos a base de minerales no metálicos; 5, industria metálica básica y productos metálicos; y 6, fabricación de maquinaria y equipo (ver anexo .

Por otro lado, considerando la expresión (2) se puede establecer que el cambio en las emisiones de CO₂ en un periodo T (ΔC_T) se descompone en el cambio de las emisiones por el efecto de la variación de la intensidad de carbonización (ΔCc), el efecto de la variación en la intensidad energética (ΔCe), y el efecto del PIB (ΔCr). Por lo tanto, la variación de las emisiones de un año base (0) a un año objetivo (T), puede expresarse como:

$$\Delta C_T = C_T - C_0 = \Delta Cc + \Delta Ce + \Delta Cr \quad (4)$$

Debido a que el interés se centra en la tasa de cambio de las emisiones a través del tiempo, se considera la derivación de los logaritmos de la expresión (3):

$$\frac{d \ln C}{dt} = \sum_i w_i \left(\frac{d \ln c}{dt} + \frac{d \ln e}{dt} + \frac{d \ln r}{dt} \right) \quad (5)$$

Finalmente, al integrar la expresión (5) para un intervalo entre 0 y T (para este estudio, un año), y siguiendo con la propuesta del enfoque LMDI de Ang y Choi

(1997), la forma aditiva para descomponer los efectos de cada factor en la variación de las emisiones está dada por:

$$\Delta C_T = \sum_i^n w_i \ln \frac{c_i^T}{c_i^0} + \sum_i^n w_i \ln \frac{e_i^T}{e_i^0} + \sum_i^n w_i \ln \frac{r_i^T}{r_i^0} \quad (6)$$

Donde:

$$W_i = \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \quad (7)$$

Corresponde a la media logarítmica de C_T y C_0 , que proporciona una descomposición aditiva exacta al ponderar la contribución de cada subsector en cada uno de los factores determinantes de la variación de las emisiones en un periodo de tiempo dado.

Cada uno de los términos de la expresión (6) describe las emisiones con las cuales contribuye en el total de la variación interanual de las mismas; de forma específica se tiene:

$$\Delta C_c = \sum_i^n \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \ln \frac{c_i^T}{c_i^0} \quad (7)$$

Donde ΔC_c denota el efecto de la intensidad de carbonización de la energía; son las emisiones con las cuales contribuye la variación de la intensidad de carbonización de la energía de cada subsector sobre la variación total de las emisiones en el periodo.

$$\Delta C_e = \sum_i^n \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \ln \frac{e_i^T}{e_i^0} \quad (8)$$

Donde ΔC_e denota el efecto de la intensidad energética; son las emisiones con las cuales contribuye la variación de la intensidad energética de cada subsector sobre la variación total de las emisiones en el periodo.

$$\Delta C_r = \sum_i^n \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \ln \frac{r_i^T}{r_i^0} \quad (9)$$

Donde ΔC_r denota el efecto del PIB; esto es, las emisiones con las cuales contribuye la variación del PIB de cada subsector sobre la variación total de las emisiones en el periodo.

Para llevar a cabo los cálculos de cada uno de los factores incluidos en el modelo se recurrió a varias fuentes. Los datos relativos a las emisiones de CO₂ se tomaron del inventario de emisiones de GEI del sector industrial en San Luis Potosí que previamente se elaboró en el capítulo 2; la cantidad de energía consumida se calculó según el tipo y cantidad de combustible utilizado por las empresas enlistadas en el mismo inventario. Los datos del PIB a precios constantes del 2008 se tomaron del Banco de Información Económica del INEGI, y para aquéllos que no estaban disponibles (2000-2002) se realizaron los cálculos usando el índice de precios implícitos al 2008. Los datos se presentan en el anexo 1.

Por otra parte, para la construcción de los escenarios se indujeron cambios en los índices de variación (IV) de cada uno de los factores. Los valores de estos cambios se aplicaron anualmente para el periodo de proyección 2013-2020, y se consideraron a partir de los índices observados en el periodo base 2000-2012. Para el planteamiento de los posibles escenarios se siguió la propuesta de Samaniego y Galindo (2009), para lo cual se construyeron intervalos de confianza del 95% para el valor medio del IV de cada uno de los factores, utilizando la distribución t de Student.

Para construir los escenarios se tomaron en cuenta todas las posibles combinaciones tomando en cuenta cada uno de los tres factores con sus respectivos tres posibles valores medios del IV, según su intervalo de confianza: límite de confianza inferior (LCI), media de la muestra y límite de confianza superior (LCS). De esta forma, resultaron 27 posibles escenarios, donde el escenario 14 es el tendencial, en el cual el índice de variación de cada factor toma su valor medio (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Combinación de los índices de variación para los posibles escenarios de emisiones al 2020, bajo los valores de la media de los intervalos de confianza: LCI, media muestral y LCS de cada uno de los tres factores del modelo.

Escenario	Índices de variación (IV)		
	Intensidad de carbonización c	Intensidad energética e	PIB manufacturero r
1	Límite inferior	Límite inferior	Límite inferior
2	Límite inferior	Límite inferior	Promedio
3	Límite inferior	Límite inferior	Límite superior
4	Límite inferior	Promedio	Límite inferior
5	Límite inferior	Promedio	Promedio
6	Límite inferior	Promedio	Límite superior
7	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior
8	Límite inferior	Límite superior	Promedio
9	Límite inferior	Límite superior	Límite superior
10	Promedio	Límite inferior	Límite inferior
11	Promedio	Límite inferior	Promedio
12	Promedio	Límite inferior	Límite superior
13	Promedio	Promedio	Límite inferior
14	Promedio	Promedio	Promedio
15	Promedio	Promedio	Límite superior
16	Promedio	Límite superior	Límite inferior
17	Promedio	Límite superior	Promedio
18	Promedio	Límite superior	Límite superior
19	Límite superior	Límite inferior	Límite inferior
20	Límite superior	Límite inferior	Promedio
21	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
22	Límite superior	Promedio	Límite inferior
23	Límite superior	Promedio	Promedio
24	Límite superior	Promedio	Límite superior
25	Límite superior	Límite superior	Límite inferior
26	Límite superior	Límite superior	Promedio
27	Límite superior	Límite superior	Límite superior

5.4 Resultados

5.4.1 Aplicación del método LMDI para identificar la contribución por subsector en el efecto de los factores determinantes sobre la variación de las emisiones de CO₂ del sector manufacturero de acuerdo a la identidad de Kaya

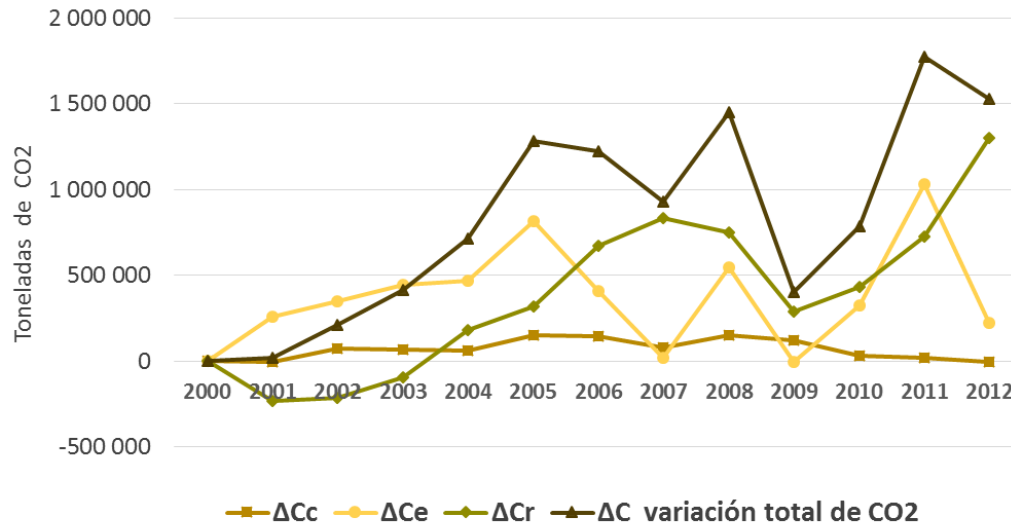
Una vez que se calcularon los valores anuales de cada uno de los factores del modelo y para cada subsector (anexo 2), se hicieron los cálculos de la expresión (6) por año, durante el periodo de estudio. En términos generales, la dinámica de la variación interanual total de las emisiones de CO₂ reflejó la contribución cambiante de cada uno de los factores del modelo (Tabla 5.3). En la variación total acumulada se distingue el efecto que impusieron los factores de la intensidad energética y el PIB manufacturero sobre el patrón de comportamiento observado en la mayoría del periodo (Gráfica 5.8).

Tabla 5.3. Contribución de los factores determinantes en la variación anual de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustible en el sector industrial de San Luis Potosí, durante el periodo 2000-2012.

Periodo	Contribución de cada factor en la variación anual de las emisiones (en toneladas de CO ₂ y porcentual)						Variación total CO ₂	
	ΔCc	%	ΔCe	%	ΔCr	%	ΔC	%
2000-2001	-6 059	-29,94	256 903	1269,22	-230 602	-1139,29	20 241	100
2001-2002	79 482	42,27	91 746	48,79	16 818	8,94	188 046	100
2002-2003	-4 357	-2,09	95 481	45,85	117 104	56,24	208 228	100
2003-2004	-6 531	-2,21	23 340	7,90	278 727	94,31	295 536	100
2004-2005	86 066	14,99	349 480	60,87	138 582	24,14	574 128	100
2005-2006	-5 048	8,03	-409 133	650,74	351 310	-558,77	-62 872	100
2006-2007	-63 877	21,67	-391 299	132,72	160 347	-54,39	-294 829	100
2007-2008	71 987	13,80	532 792	102,13	-83 122	-15,93	521 657	100
2008-2009	-28 448	2,72	-556 273	53,09	-463 029	44,19	-1 047 750	100
2009-2010	-92 171	-24,13	330 137	86,43	144 008	37,70	381 975	100
2010-2011	-12 956	-1,31	709 980	71,60	294 509	29,70	991 534	100
2011-2012	-20 853	8,40	-807 464	325,26	580 068	-233,66	-248 250	100
Total	-2 766		225 690		1 304 721		1 527 644	

Existen periodos interanuales de cambios importantes en la variación, que más adelante se explicarán al abordar el efecto de cada factor del modelo; sin embargo,

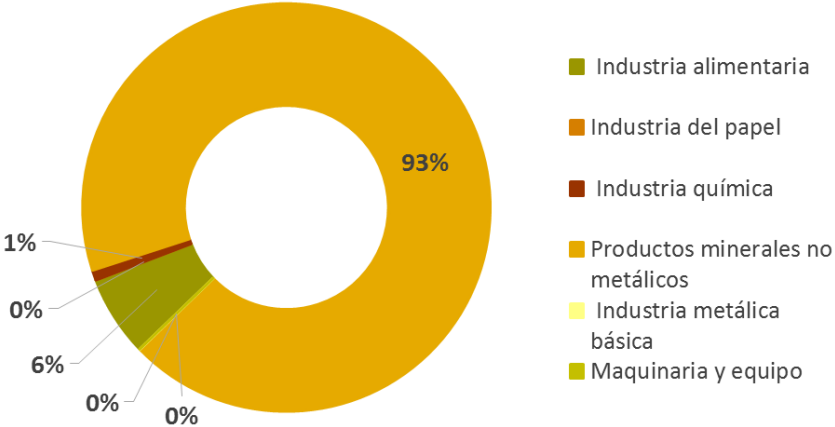
cabe mencionar que el cambio predominante del periodo 2009-2010 es el producto de la crisis económica global que provocó que se dejaran de emitir 1 047 750 tCO₂.



Gráfica 5.8. Variación acumulada de las emisiones de CO₂ por factores determinantes.

En general, el factor de la intensidad de carbonización de la energía muestra una baja contribución en la variación de las emisiones; sin embargo, se aprecia un efecto importante con una contribución del 42,27% en la variación total entre 2001-2002, y no se desprecian sus contribuciones del 14,99% y - 24,17% en los periodos 2004-2005 y 2009-2010, respectivamente (Tabla 5.3.). Para analizar la dinámica de este factor, se debe tomar en cuenta que cada tipo de combustible conlleva cierta cantidad de energía (BEP), así como su respectiva proporción de emisiones de CO₂, de tal forma que a cada combustible le corresponde cierta intensidad de carbonización energética, por lo que posibles cambios en este factor solo se experimentarán por una variación en la matriz de combustibles, debido a la inclusión de un distinto combustible o la exclusión de uno ya existente, así como por cambios en la proporción de los mismos.

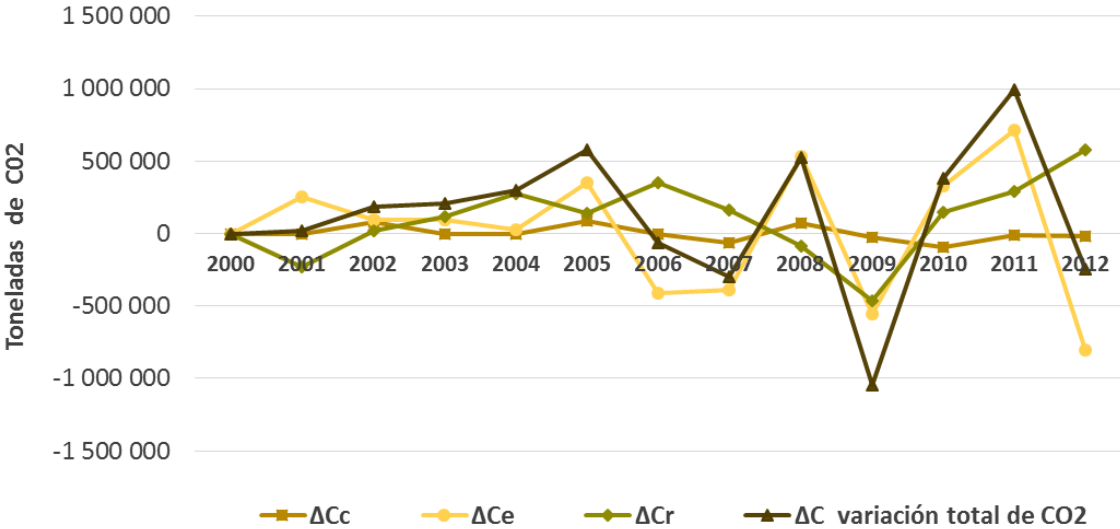
La matriz energética del sector industrial de San Luis Potosí se compone por combustóleo, coque de petróleo (petcoke), diésel, gas licuado de petróleo (GLP), gas natural y bagazo de caña. El efecto importante que observó la intensidad de la carbonización de la energía en la variación de las emisiones entre 2001-2002 al contribuir con 79 482 tCO₂, obedeció a un incremento de este factor en el subsector de productos minerales no metálicos. La intensidad de carbonización de este subsector cambió de 0,4123 tCO₂ por cada BEP a 0,4551 entre 2001-2002; de tal forma que éste contribuyó con el 93% de las emisiones con las cuales participó el factor de la intensidad de carbonización en la variación de las emisiones durante 2001-2002 (Gráfica 5.9).



Gráfica 5.9. Contribución de los subsectores en el efecto de la intensidad de carbonización de la energía sobre la variación de las emisiones en 2001-2002

El factor determinante de la intensidad energética, medido como los BEP necesarios para producir mil pesos del PIB manufacturero, presentó constantes cambios en su efecto sobre la variación de las emisiones, con una importante participación en la mayoría de las variaciones interanuales, pero existen episodios como 2004-2005, 2007-2008, 2010-2011 y 2011-2012 en los que su efecto fue dominante sobre los demás factores (Gráfica 5.10). Para explicar la dinámica del efecto de este factor es

necesario conocer la contribución del PIB de cada subsector, pero también la demanda energética requerida para tal contribución, debido a que existen subsectores con una intensa demanda de energía que es cubierta con combustibles de altos factores de emisión de CO₂, pero que en términos económicos no son grandes contribuyentes en el PIB.



Gráfica 5.10. Dinámica de la contribución de cada factor en la variación interanual de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustible en el sector manufacturero de San Luis Potosí.

Para evaluar la contribución de cada subsector en el efecto que la intensidad energética (ΔC_e) reflejó en las emisiones durante los periodos antes mencionados, se analizaron los resultados de la ecuación (8) de la metodología. En los tres periodos se detectó la importante contribución de los subsectores de la industria alimentaria y de productos minerales no metálicos sobre el efecto que reflejó la intensidad energética en el incremento de la variación de las emisiones (Tabla 5.4). Estas contribuciones se deben al incremento que ambos subsectores reflejaron en su intensidad energética; por ejemplo, la de la industria alimentaria pasó de 0,15295 a 0,18714 entre 2004-2005, y para el subsector de productos minerales no metálicos estos valores fueron 0,43101 y 0,48587.

Tabla 5.4. Contribución (tCO₂) de los subsectores en el efecto de la intensidad energética sobre la variación de las emisiones.

Período	Industria alimentaria	Industria del papel	Industria química	P. minerales no metálicos	Industria metálica	Maquinaria y equipo	ΔCe
2004-2005	231 839	-13 631	-16 314	292 147	-165 560	20 999	349 480
2007-2008	124 066	14 723	23 089	326 828	135 053	-90 967	532 792
2010-2011	224 699	16 702	-14 701	487 879	1 749	-6 348	709 980

Finalmente, el efecto del PIB manufacturero se mantiene positivo en la mayoría de los periodos, con efectos importantes en el incremento de las emisiones, como en los periodos 2002-2003, 2003-2004 Y 2009-2010; sin embargo, se presentaron otros como el 2000-2001, 2007-2008 y 2008-2009 en los que se presentaron crisis económicas, y como consecuencia se evitaron emisiones por el efecto del factor del PIB. Por otra parte, si solo se considera la contribución acumulada de este factor, se puede observar su gran aportación en la variación total de las emisiones durante el periodo en estudio, por lo que se puede inferir que la dinámica del PIB tiene un gran impacto sobre la variación de las emisiones de CO₂ a mediano o largo plazo; cuestión que debe considerarse para las posibles estrategias de reducción.

5.4.2 Escenarios de las emisiones proyectadas al 2020 a partir de intervalos de confianza de la media de los índices de variación de los factores determinantes

Con los valores observados de los factores determinantes durante el periodo base 2000-2012 (Anexo 2), se obtuvieron los índices de variación (IV) de cada periodo interanual (Tabla 5.5). Se efectuaron pruebas de normalidad con el estadístico de D'Agostino para los IV de cada factor (Anexo 4); y se construyeron intervalos de confianza del 95% bajo la distribución t, para la media de dichos índices (Tabla 5.6). Posteriormente, se aplicaron estos valores de forma constante en la expresión (2) descrita en la metodología, según lo preestablecido para cada uno de los 27 escenarios propuestos, y se calcularon las emisiones anuales del periodo de proyección 2013-2020.

Tabla 5.5. Índices de variación interanual de la intensidad de carbonización de la energía (c), la intensidad energética (e) y el PIB manufacturero (r), durante el período base 2000-2012.

Periodo	Índices de variación (IV)		
	Intensidad de carbonización c_i/c_{i-1}	Intensidad energética e_i/e_{i-1}	PIB manufacturero r_i/r_{i-1}
2000-2001	1,005440	1,064278	0,940313
2001-2002	1,021703	1,007385	1,027190
2002-2003	0,999177	1,054846	1,005662
2003-2004	0,997954	0,992289	1,090895
2004-2005	1,047619	1,107164	0,986605
2005-2006	0,984250	0,960976	1,042657
2006-2007	0,978893	0,928513	1,027947
2007-2008	1,027352	1,077978	1,015282
2008-2009	0,985054	0,905334	0,872172
2009-2010	0,958235	1,012982	1,137502
2010-2011	1,018302	1,102465	1,108851
2011-2012	0,975837	0,856758	1,137191

Tabla 5.6. Valores de los límites de confianza para la media de los IV de cada factor determinante.

Factor determinante	Intervalos de confianza para la media de los Índices de variación		
	Límite de confianza inferior (LCI)	Media muestral	Límite de confianza superior (LCS)
Intensidad de carbonización de la energía	0,983841	0,999985	1,016128
Intensidad energética	0,954804	1,005914	1,057024
PIB del sector manufacturero	0,982476	1,032689	1,082902

A partir del 2013 se indujeron los cambios para proyectar las emisiones anuales hasta el 2020. Por ejemplo, para proyectar las emisiones del 2013 para el escenario 1 (E1), según lo previsto en la metodología, se tomaron los IV del límite de confianza inferior (LCI) de cada factor:

$$IVc = LCI = \frac{c_{2013}}{c_{2012}} = 0,983841$$

$$IVe = LCI = \frac{e_{2013}}{e_{2012}} = 0,954804$$

$$IVr = LCI = \frac{r_{2013}}{r_{2012}} = 0,982476$$

Donde: IVc corresponde al índice de variación de la intensidad de carbonización de la energía, IVe de la intensidad energética e IVr al del PIB.

Posteriormente se aplicaron estos IV a los valores de los factores durante el último año del periodo base (2012), para estimar los valores de los factores durante el 2013:

$$c_{2013} = \frac{c_{2013}}{c_{2012}} c_{2012} = 0,983841 (0,409679) = 0,403059$$

$$e_{2013} = \frac{e_{2013}}{e_{2012}} e_{2012} = 0,954804 (0,171522) = 0,163770$$

$$r_{2013} = \frac{r_{2013}}{r_{2012}} r_{2012} = 0,982476 (68\ 208\ 588) = 67\ 013\ 300$$

Una vez que se estimaron los valores que tomarán los factores durante el 2013, según los IV previsto para el periodo 2012-2013, se aplicó la ecuación (2) de la metodología; de forma tal que las emisiones de CO₂ proyectadas al 2013 serán:

$$C_{2013} = c_{2013} e_{2013} r_{2013} = (0,403059)(0,163770)(67\ 013\ 300) = 4\ 423\ 479\ ton$$

Los IV de cada escenario se mantuvieron constantes para cada periodo interanual entre 2013-2020. De esta forma se procedió para estimar las emisiones de cada uno de los años del periodo proyectado hasta alcanzar el 2020 (Tabla 5.7).

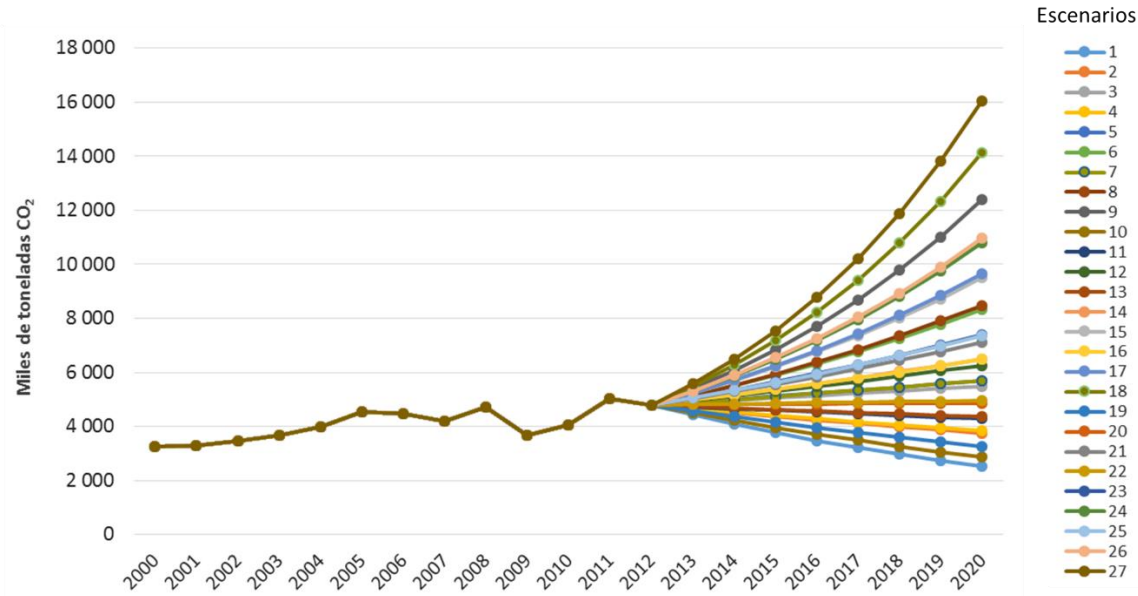
Tabla 5.7. Emisiones de CO₂ proyectadas al 2020, según los IV de cada escenario.

Escenario	Indices de variación interanual			Emisiones 2020
	Intensidad de carbonización c	Intensidad energética e	PIB manufacturer	tCO ₂
1	0,983841	0,954804	0,98248	2 522 854
2	0,983841	0,954804	1,03269	3 759 014
3	0,983841	0,954804	1,08290	5 495 811
4	0,983841	1,005914	0,98248	3 828 827
5	0,983841	1,005914	1,03269	5 704 895
6	0,983841	1,005914	1,08290	8 340 757
7	0,983841	1,057024	0,98248	5 691 914
8	0,983841	1,057024	1,03269	8 480 867
9	0,983841	1,057024	1,08290	12 399 326
10	0,999985	0,954804	0,98248	2 873 683
11	0,999985	0,954804	1,03269	4 281 744
12	0,999985	0,954804	1,08290	6 260 061
13	0,999985	1,005914	0,98248	4 361 265
14	0,999985	1,005914	1,03269	6 498 220
15	0,999985	1,005914	1,08290	9 500 626
16	0,999985	1,057024	0,98248	6 483 433
17	0,999985	1,057024	1,03269	9 660 219
18	0,999985	1,057024	1,08290	14 123 581
19	1,016128	0,954804	0,98248	3 266 479
20	1,016128	0,954804	1,03269	4 867 006
21	1,016128	0,954804	1,08290	7 115 734
22	1,016128	1,005914	0,98248	4 957 396
23	1,016128	1,005914	1,03269	7 386 446
24	1,016128	1,005914	1,08290	10 799 245
25	1,016128	1,057024	0,98248	7 369 639
26	1,016128	1,057024	1,03269	10 980 652
27	1,016128	1,057024	1,08290	16 054 100

Análisis descriptivo de los escenarios

Una vez que se obtuvieron las emisiones proyectadas al 2020 para cada uno de los 27 escenarios, se utilizó el software Minitab versión 16.0, para llevar a cabo contrastes al nivel de significancia de 0.05 y probar la normalidad de los resultados (Anexo 6). Dados los valores obtenidos de P ($P > 0,05$) se comprueba que los datos provienen de una distribución normal.

De acuerdo a los 27 escenarios estimados, las emisiones de CO₂ generadas en el 2020 por el sector manufacturero de San Luis Potosí podrían alcanzar desde 2 522 854 tCO₂, reflejando con ello un escenario de reducción en el cual el IV de cada factor toma el valor del límite de confianza inferior (LCI), hasta 16 054 100 tCO₂ bajo un escenario 27 (E27), que se sostiene bajo los límites de confianza superior (LCS) del IV de cada factor determinante (Gráfica 5.11). Por otra parte, la mediana de las emisiones se presentó en el escenario 16, con 6 483 433 tCO₂, en el cual el IV del factor de la intensidad de carbonización tomó el valor medio puntual, el de la intensidad de carbonización el LCS, y del PIB tomó su LCI.



Gráfica 5.11. Posibles escenarios de las emisiones de CO₂ al 2020, según las combinaciones de los IV de cada factor determinante.

Del resumen descriptivo de los escenarios (Anexo 6), se observa que el 50% de las emisiones menores a la mediana se encuentra entre 2 522 854 y 6 483 433 tCO₂, con un rango de 3 960 579 tCO₂; sin embargo, la segunda mitad con valores entre la mediana y el valor máximo de 16 054 100 tCO₂, presentó un rango de 9 570 677 toneladas; es decir, la primera mitad de las proyecciones (orden ascendente)

presenta una mayor densidad que la segunda. Por otra parte, también se puede concluir, con un nivel de confianza del 95%, que la mediana de las emisiones del 2020 podría encontrarse entre 4 954 715 y 8 344 193 tCO₂; entre este rango de emisiones cabe la posibilidad de que en el 2020 se presenten los escenarios: E3, E5, E6, E7, E8, E12, E14, E16, E21, E22, E23 y E25.

También se puede concluir, con un nivel de confianza del 95%, que la media de las emisiones del 2020 podría encontrarse entre 5 783 402 y 8 517 620 tCO₂. Entre este rango de valores se encuentran las emisiones proyectadas por los escenarios: E6, E8, E12, E14, E16, E21, E23 y E25.

Análisis cualitativo de los escenarios

Si bien es cierto que no hay escenarios favoritos, existen aquéllos que presentan pocas probabilidades de presentarse, dados los valores que pueden llegar a tomar los factores determinantes de acuerdo a los IV asignados. Para descartar los escenarios con muy poca probabilidad de ocurrencia, primero se tomaron en cuenta los factores que resultaron de mayor efecto sobre las variaciones interanuales de las emisiones de CO₂. Según los resultados obtenidos en el modelo de Kaya, éstos fueron el PIB manufacturero y la intensidad energética.

En primer lugar, se analizaron los escenarios en los que el IV del PIB tomó el valor de su LCI; entre los que se encuentra el E1, que presentó las menores emisiones proyectadas al 2020, con 2 522 854 tCO₂; esto es, el 77,22% de las liberadas en el 2000, que es el año base. Bajo este escenario, el IV del PIB es 0,982476 que significa una reducción sostenida del 1,75% anual del producto durante el periodo 2013-2020. Sin embargo, estas condiciones solo se presentan bajo episodios de crisis económicas a nivel nacional o internacional, pero una crisis sostenida durante ocho años (2013-2020) tiene muy pocas posibilidades de ocurrir. Los periodos consecutivos de crisis económica que se han presentado en México han sido esporádicos; los últimos fueron durante 1982 y 1983, y a partir de ahí se han

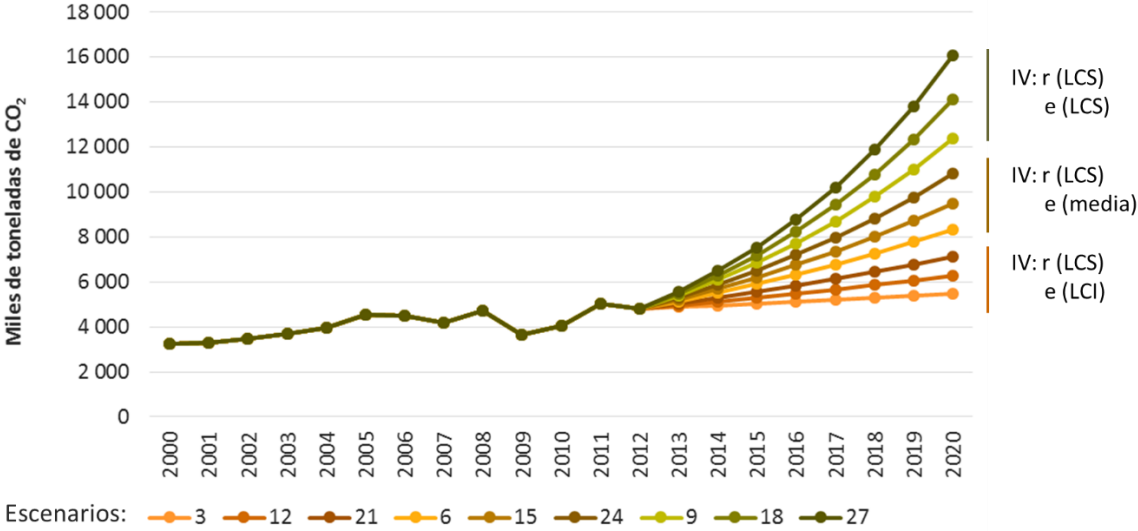
experimentado episodios de recesión en 1986, 1995, 2001 y 2009 (Banco Mundial, s.f.). Además, el PIB del sector manufacturero de San Luis reflejó una TAV media del 4,45% (promedio entre 2003-2012, a precios del 2008) (Tabla 5.8), que está por arriba del 2,17% nacional (INEGI, 2014). Por lo anterior, la posibilidad de un escenario bajo una reducción económica sostenida del - 1,75% anual durante ocho años es muy remota, por lo que los escenarios E1, E4, E7, E10, E13, E16, E19, E22 y E25 tienen muy pocas posibilidades de ocurrir.

Tabla 5.8. Evolución de la tasa anual de variación del PIB manufacturero de San Luis Potosí. Elaboración propia con datos de INEGI (2001, 2005, 2012).

Tasa anual de variación del PIB manufacturero (TAV)			
Año	TAV	Año	TAV
1994	9,2454	2004	9,0047
1995	-9,9607	2005	-1,3593
1996	12,4907	2006	4,0162
1997	9,9569	2007	2,2542
1998	6,7213	2008	1,2150
1999	2,1338	2009	-13,0549
2000	8,5155	2010	13,5507
2001	-5,3029	2011	11,0717
2002	1,8057	2012	11,6793
2003	7,4677		

En el extremo opuesto, cuando la media del IV del PIB toma el valor del LCS (1,08290), se detectó que cuatro de los doce periodos interanuales del periodo base presentaron un IV igual o superior a éste, y tres fueron consecutivos entre 2009-2012. Aunque un panorama con una TAV del PIB del 8,29% es muy optimista, no se debe descartar la posibilidad de que estas condiciones se presenten de forma constante durante el periodo 2013-2020. Los nueve escenarios contruidos bajo estas condiciones, presentaron diferentes proyecciones de crecimiento de las emisiones; desde 5 495 811 tCO₂ bajo el E3, hasta 16 054 100 tCO₂ en el E27 (Gráfica 5.12). Las diferencias observadas se deben, en gran medida, al valor que

tomó el IV medio de la intensidad energética, que resultó ser el segundo factor determinante de mayor efecto sobre la variación interanual de las emisiones.



Gráfica 5.12. Emisiones proyectadas al 2020, bajo los escenarios que sustentan el IV del límite de confianza superior para el factor del PIB (r), con distintos valores de la intensidad energética (e).

Ahora bien, para analizar la posibilidad de aquéllos escenarios en los que la media del IV del PIB y de la intensidad energética tomaron simultáneamente los valores de sus correspondientes LCS, se realizaron de forma regresiva los cálculos para conocer el PIB y la energía que se generarán a partir del 2013. En primer lugar, los IV previstos para estos escenarios fueron:

$$IVe = \frac{e_{2013}}{e_{2012}} = 1,057024 \quad IVr = \frac{r_{2013}}{r_{2012}} = 1,082902$$

Donde: *IVe* corresponde al índice de variación de la intensidad energética y *IVr* al del PIB.

De tal forma que el PIB y la intensidad energética que se producirán en el sector manufacturero durante el 2013 se obtienen del producto de estos IV y los valores que tuvieron los factores durante el 2012:

$$r_{2013} = r_{2012} \left(\frac{r_{2013}}{r_{2012}} \right) = (68\,208\,588)(1,082902) = 73\,863\,216$$

$$e_{2013} = e_{2012} \left(\frac{e_{2013}}{e_{2012}} \right) = (0,1715225)(1,057024) = 0,181303$$

Una vez obtenidos los datos anteriores, se logró calcular la energía (BEP), que se consumirá en el 2013:

$$\text{Intensidad energética} = e = \text{Energía/PIB} = \text{BEP}/r$$

$$\therefore \text{BEP}_{2013} = e_{2013} \times r_{2013} = 13\,391\,623$$

Estos cálculos se llevaron a cabo para cada año del periodo proyectado 2013-2020 (Tabla 5.9). Con el PIB y la energía consumida anualmente, se calculó el IV interanual, resultando que el PIB aumentará cada año en un 8,29% y los BEP en un 14,47%. Un crecimiento económico proyectado entre 2013-2020, sostenido bajo estas condiciones, en las que la energía crece de forma constante a una tasa mucho mayor que la del PIB, reflejaría una creciente deficiencia del uso de la energía en los procesos del sector manufacturero o un crecimiento sostenido, pero dominado por subsectores poco aportadores del PIB y que son intensos en el uso de energía. En el periodo base, esta última situación se presentó de forma discontinua en dos ocasiones, debido a un incremento en la energía consumida por parte de subsectores que son intensos en el uso de energía, pero que no son grandes contribuyentes del PIB manufacturero estatal.

Por lo anterior, se puede concluir que los escenarios E9, E18 y E27, sostenidos bajo los límites de confianza superior del IV del PIB y de la intensidad energética, tienen muy poca posibilidad de ocurrencia; a excepción de que el sector manufacturero de

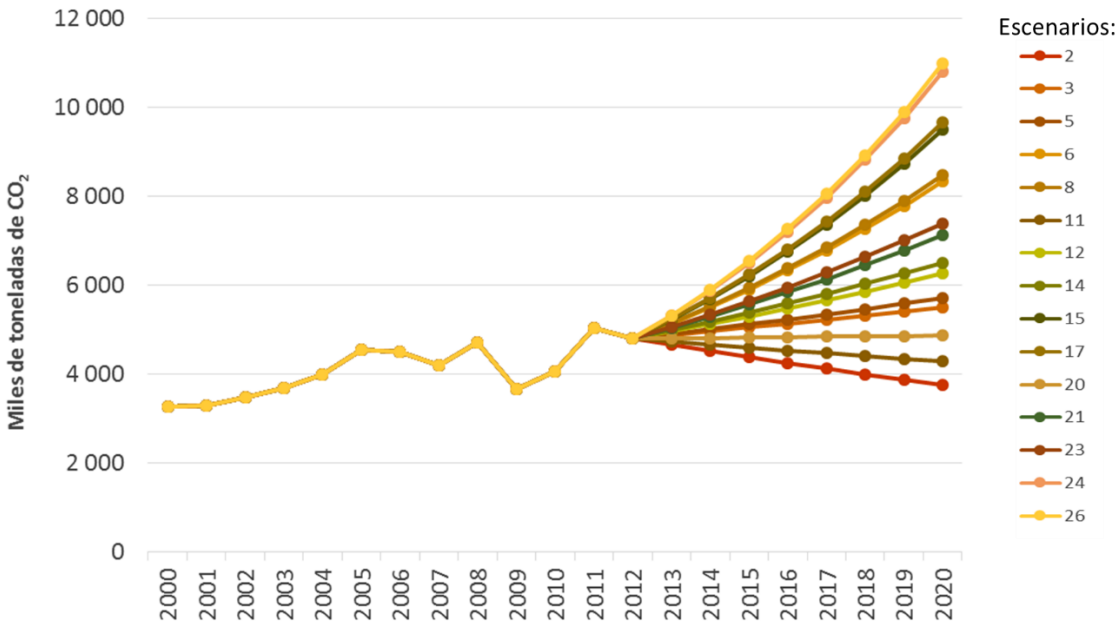
San Luis Potosí adoptara un giro industrial concentrado, en su gran mayoría, en subsectores intensos en energía, pero poco contribuyentes en el PIB. Sin embargo, esta situación estaría alejada del plan de desarrollo estatal, cuyo objetivo consiste en impulsar la instalación de empresas de alto valor agregado, lo cual se ha hecho realidad en los últimos años, pues el 65% de las empresas manufactureras que se han instalado en la entidad entre el 2006-2012, corresponden al subsector de fabricación de maquinaria y equipo (SEDECO, 2010).

Tabla 5.9. Valores del PIB y la intensidad energética, proyectados bajo los valores del límite de confianza superior de cada factor.

Año	PIB manufacturero r	Intensidad Energética e	BEP= e x r
2013	73 863 228	0,181303	13 391 661
2014	79 986 651	0,191642	15 328 814
2015	86 617 718	0,202570	17 546 185
2016	93 798 515	0,214122	20 084 306
2017	101 574 616	0,226332	22 989 576
2018	109 995 373	0,239238	26 315 104
2019	119 114 229	0,252881	30 121 682
2020	128 989 057	0,267301	34 478 896

Por lo antes expuesto, de los 27 escenarios iniciales, se descartaron aquéllos que presentaron muy pocas posibilidades de ocurrir, debido a la dinámica de sus factores determinantes. Esto es, se eliminaron los nueve que fueron construidos bajo un IV del PIB en su LCI, así como los tres anteriores en los que el IV de la intensidad energética y del PIB permaneció simultáneamente en su LCS. Dado lo anterior, podemos concluir que los quince escenarios restantes tienen una mayor posibilidad de presentarse; éstos reflejaron que las emisiones del 2020 pueden ser al menos 3 759 013 tCO₂ bajo un E2, que descansa en la posibilidad de reducir la carbonización a una TAV del – 1,61% y la intensidad energética al – 4,52%, mientras el PIB crece a una tasa inercial del 3,27%.

Las emisiones en el 2020 también podrían llegar a 10 980 652 tCO₂ en el E26, que se construyó bajo una TAV inercial del PIB del 3,27%, pero con un incremento constante del 5,70% en la intensidad energética y del 1,61% en la carbonización (Gráfica 5.13). Por otra parte, la mediana de las emisiones dentro de estos quince escenarios, con 7 115 734 tCO₂ le corresponde al E21, que se construyó bajo la premisa de un crecimiento optimista del PIB a una TAV del 8,29%, una tasa del – 4,52% en la intensidad energética, y del 1,61% para la intensidad de carbonización.



Gráfica 5.13. Escenarios más probables, bajo distintos supuestos de variación de los factores determinantes de la identidad de Kaya.

5.4.3 Escenarios de Reducción

En el escenario base o tendencial, asignado con el número 14, los IV de todos los factores tomaron el valor medio puntual del periodo base (2000-2012). Se puede decir que es el escenario que “se espera” que suceda para el 2020 si la inercia del sector manufacturero de San Luis Potosí prevalece según la media observada de

los IV de cada factor durante el periodo base. Bajo este panorama, las emisiones al 2020 serán 6 498 220 tCO₂, prácticamente el doble de las emitidas durante el año base 2000. Tomando como referencia este escenario, todos aquéllos que proyectaron menos emisiones se pueden considerar como posibles proyecciones de reducción, entre los que se encuentran los escenarios E1-E5, E7, E10-E13, E16, E19-E20 y E22; sin embargo, de éstos se descartaron los que se construyeron con el LCI del IV del PIB, por las razones que anteriormente se han expuesto. Por lo tanto, solo los escenarios E2, E3, E5, E11, E12 y E20 se pueden considerar como escenarios de reducción, en el sentido de que se espera que sus emisiones al 2020 sean menores que las generadas por el escenario inercial (Gráfica 5.14).



Gráfica 5.14. Escenarios de reducción, respecto a las emisiones proyectadas al 2020 por la línea base o tendencial.

De acuerdo al escenario tendencial, el crecimiento del sector manufacturero de San Luis Potosí mantendrá, durante el periodo 2013-2020, una TAV del PIB del 3,27%, un 0,59% para la intensidad energética y la intensidad de carbonización con una

tasa del 0,0015%; y bajo estas condiciones, las emisiones llegarán a 6 498 220 tCO₂ en el 2020. A partir de este escenario inercial, se identificaron aquéllos que presentan un potencial de mitigación de CO₂; es decir, aquéllos que presentaron emisiones al 2020 menores a éste (Tabla 5.10).

Tabla 5.10. Índices de variación de los factores determinantes de cada escenario, y su tasa de reducción con respecto a las proyectadas por el escenario tendencial.

Escenario	Índices de variación			Emisiones 2020 tCO ₂	% reducción de CO ₂
	c	e	r		
2	0,98384	0,95480	1,03269	3 759 014	42,15
11	0,99998	0,95480	1,03269	4 281 744	34,11
20	1,01613	0,95480	1,03269	4 867 006	25,10
3	0,98384	0,95480	1,08290	5 495 811	15,43
5	0,98384	1,00591	1,03269	5 704 895	12,21
12	0,99998	0,95480	1,08290	6 260 061	3,66
*14	0,99998	1,00591	1,03269	6 498 220	

Las condiciones de crecimiento para el sector manufacturero bajo los escenarios E2, E11 y E20 se sostienen bajo una TAV del PIB del 3,27% que corresponde con el crecimiento promedio durante el período base; y una reducción de la intensidad energética a una tasa del – 4,52%, que es el IV de su LCI. La diferencia entre estos tres escenarios la establece el IV que tomó el factor de la intensidad de carbonización, por lo que la diferencia se basa entonces en la composición de la matriz energética del sector (Tabla 5.11). Para el E2, el IV de la intensidad de carbonización es el LCI, es decir una TAV del – 1,616%; para el E11 fue 0,0015%; y para el E20, del 1,613%.

Para aprovechar el potencial de mitigación de 2 739 205 tCO₂ que presenta el escenario E2, las medidas de mitigación deberán dirigirse hacia estrategias que impacten en la eficiencia energética y hacia el reemplazo de combustibles de baja carbonización. Por otra parte, de acuerdo a los resultados del análisis de los factores determinantes por cada subsector manufacturero bajo la metodología LMDI, los giros de mayor efecto en la variabilidad de las emisiones de CO₂ fueron: fabricación

de minerales no metálicos, la industria alimentaria y la industria metálica básica. Por esto, las sugerencias para la reducción de emisiones futuras, se perfilarán hacia estos subsectores.

Tabla 5.11. Características de la dinámica industrial para los escenarios de mitigación de emisiones de CO₂.

<p style="text-align: center;">Escenario 2</p> <p>Crecimiento del PIB a una TAV del 3,27%.</p> <p>Reducción de la intensidad energética a una TAV del - 4,52%, sostenida bajo un desarrollo industrial perfilado a subsectores con baja demanda energética de combustibles.</p> <p>Adopción de la matriz energética hacia el uso de gas natural, bajo una reducción de la carbonización con una TAV del - 1,62%.</p> <p>Tasa de reducción de emisiones de CO₂ respecto al escenario tendencial: 42,15%</p>	<p style="text-align: center;">Escenario 11</p> <p>Crecimiento del PIB a una TAV del 3,27%.</p> <p>Reducción de la intensidad energética a una TAV del - 4,52%, sostenida bajo un desarrollo industrial perfilado a subsectores con baja demanda energética de combustibles.</p> <p>La matriz energética mantiene la combinación de combustibles actual, con una TAV de la intensidad de carbonización del 0,0015%.</p> <p>Tasa de reducción de emisiones de CO₂ respecto al escenario tendencial: 34,11%</p>	<p style="text-align: center;">Escenario 20</p> <p>Crecimiento del PIB a una TAV del 3,27%.</p> <p>Reducción de la intensidad energética a una TAV del - 4,52%, sostenida bajo un desarrollo industrial perfilado a subsectores con baja demanda energética de combustibles.</p> <p>Adopción de la matriz energética hacia el uso de combustibles de alto factor de carbonización (coque, combustóleo), con una TAV de la intensidad de carbonización del 1,61%.</p> <p>Tasa de reducción de emisiones de CO₂ respecto al escenario tendencial: 25,10%</p>
<p style="text-align: center;">Escenario 3</p> <p>Crecimiento del PIB a una TAV del 8,29%.</p>	<p style="text-align: center;">Escenario 12</p> <p>Crecimiento del PIB a una TAV del 8,29%.</p>	<p style="text-align: center;">Escenario 5</p> <p>Crecimiento del PIB a una TAV del 3,27%.</p>

<p>Reducción de la intensidad energética a una TAV del - 4,52%, sostenida bajo un desarrollo industrial perfilado a subsectores con baja demanda energética de combustibles.</p>	<p>Reducción de la intensidad energética a una TAV del - 4,52%, sostenida bajo un desarrollo industrial perfilado a subsectores con baja demanda energética de combustibles.</p>	<p>La intensidad energética se mantiene bajo las características actuales, con una TAV del 0.59%</p>
<p>Adopción de la matriz energética hacia el uso de gas natural, bajo una reducción de la carbonización con una TAV del - 1,62%</p>	<p>La matriz energética mantiene la combinación de combustibles actual, con una TAV de la intensidad de carbonización del 0,0015%.</p>	<p>Adopción de la matriz energética hacia el uso de gas natural, bajo una reducción de la carbonización con una TAV del - 1,62%</p>
<p>Tasa de reducción de emisiones de CO₂ respecto al escenario tendencial: 15,43%</p>	<p>Tasa de reducción de emisiones de CO₂ respecto al escenario tendencial: 12,21%</p>	<p>Tasa de reducción de emisiones de CO₂ respecto al escenario tendencial: 3,66%</p>

Los escenarios E3 y E12 se fundamentan en un crecimiento optimista del sector manufacturero, con una TAV del PIB del 8,29%, y del - 4,52% para la intensidad energética. La diferencia de estos escenarios estriba en la intensidad de carbonización; de forma tal que, bajo el E3, con una TAV - 1,62%, se logra una reducción de emisiones del 15,43%; mientras que en el E12, que maneja una TAV de la carbonización del 0,0015%, la reducción solo alcanzó un 12,21%.

Finalmente, el E5 se sostiene bajo las condiciones inerciales del PIB y de la intensidad energética, pero con una migración gradual de la matriz energética hacia el uso de gas natural, por lo que la intensidad de carbonización se reduce a una TAV del - 1,62%. Bajo estas condiciones, casi inerciales, la reducción de emisiones solo alcanza un 3,66% con respecto a las emitidas en el escenario tendencial.

5.5 Discusión

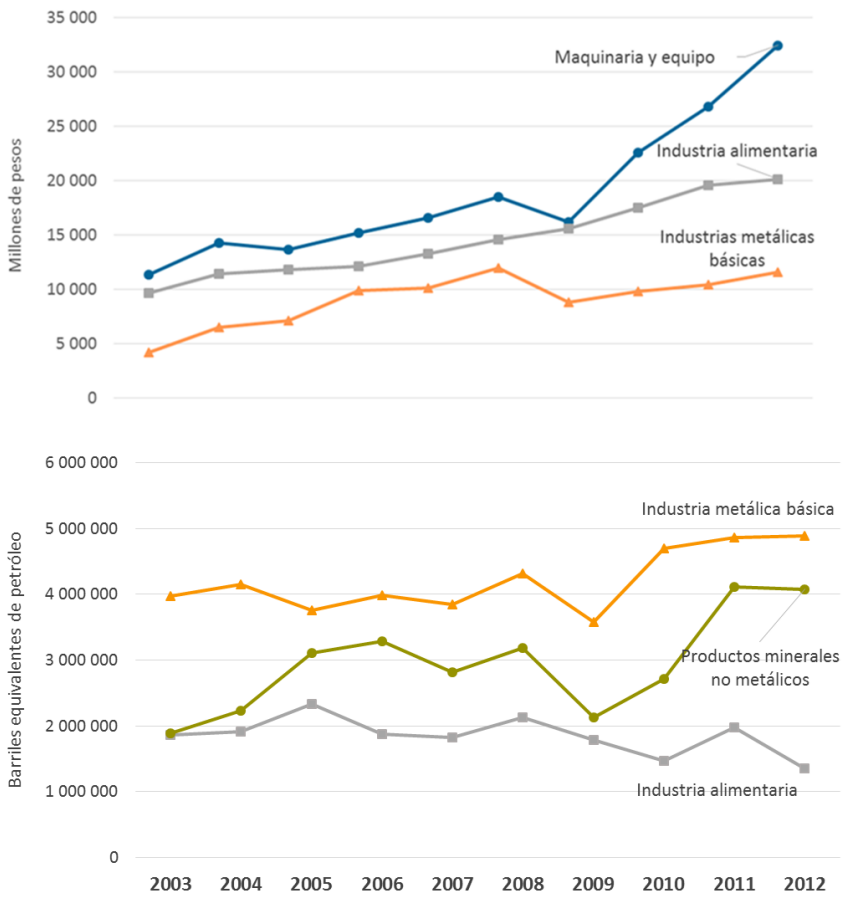
Si bien es cierto que con los resultados obtenidos coincidimos con varios autores, en el sentido de que el incremento del PIB es de gran impacto en las emisiones de CO₂ (Alcántara y Padilla, 2010; Galindo y Samaniego, 2010), también es importante reconocer que la influencia de la estructura del sector manufacturero tiene un impacto significativo, que se manifiesta a través del efecto de la intensidad energética. Por ejemplo, con la descomposición de los factores que se obtuvo con el método LMDI, se identificaron episodios como el 2005-2006, 2006-2007 y 2011-2012 en los que el PIB manifestó un incremento pero las emisiones se redujeron por el efecto de la intensidad energética. De forma puntual, entre el 2005-2006 el PIB se incrementó en un 4,265%; pero las emisiones cayeron por el efecto de la intensidad energética que contribuyó para que dejaran de emitirse 409 133 tCO₂ y el subsector que más contribuyó en ello fue la industria alimentaria, que dejó de emitir 245 609 toneladas (Tabla 5.12).

Tabla 5.12. Contribución (tCO₂) de los subsectores en el efecto positivo (emisiones evitadas) de la intensidad energética sobre la variación de las emisiones.

Período	Industria alimentaria	Industria del papel	Industria química	P. minerales no metálicos	Industria metálica	Maquinaria y equipo	ΔCe
2005-2006	-245 609	-16 980	1 845	-86 813	-79 006	17 429	-409 133
2006-2007	-43 658	41 729	-4 470	-377 380	-17 115	9 595	-391 299
2011-2012	-319 301	59 543	-5 496	-160 097	-388 655	6 542	-807 464

Por lo anterior, coincidimos con Chen et al. (2013) y O'Mahony (2013), en el sentido de que la estructura del sector industrial puede impactar en el efecto de la intensidad energética sobre las emisiones. La estructura sectorial de este caso de estudio muestra subsectores con grandes contribuciones en el PIB, pero que no son de los más demandantes en energía proveniente de combustibles fósiles, y que por lo tanto su efecto en la variación de las emisiones no es importante, y viceversa (Gráfica 5.11).

Si bien es cierto que en la variación acumulada durante el periodo base 2000-2012, el efecto del PIB resultó predominante, también puede observarse que, si se analizan las contribuciones de cada uno de los factores determinantes sobre las emisiones acumuladas para distintos periodos, se aprecia que éstas manifiestan cambios (Tabla 5.13). Estos cambios en las contribuciones indican que no existen efectos constantes y sostenidos por cada uno de los factores; lo cual puede ser indicativo de que esos cambios obedecen, como antes se ha mencionado, a la dinámica interna de los subsectores más intensos en la demanda de energía.



Gráfica 5.11. Dinámica del PIB de los tres subsectores más contribuyentes en el PIB manufacturero estatal (parte superior), y la dinámica de energía por el consumo de combustible de los tres subsectores más demandantes de energía.

Tabla 5.13. Contribución de los factores determinantes en la variación acumulada de las emisiones para distintos períodos (en tCO₂ y porcentual).

Período	ΔC_c	ΔC_e	ΔC_r	ΔC
2000-2004	62 534	467 470	182 047	712 051
2000-2008	151 662	549 309	749 164	1 450 135
2000-2012	-2 766	225 690	1 304 721	1 527 644
Contribución (%)				
2000-2004	8,782	65,651	25,567	100
2000-2008	10,458	37,880	51,662	100
2000-2012	-0,181	14,774	85,407	100

Por otra parte, de la amplia gama de escenarios de emisiones proyectados al 2020, se detectaron aquéllos que podrían presentarse si las políticas de desarrollo nacionales o estatales solo se perfilaran hacia un crecimiento económico inercial, sin importar el alcance de la intensidad energética y de la carbonización. Este sería el caso del E26, bajo el cual se generarían 10 980 652 tCO₂, debido a que el PIB se mantendría a una TAV promedio del 3,67% pero las tasas de la intensidad energética y de carbonización tomarían su máximo valor como consecuencia de un cambio gradual hacia el uso de combustibles de alta carbonización y una creciente deficiencia en el uso de energía.

Galindo y Aroche (2009) reconocen que, en la búsqueda de las opciones de reducción más pertinentes, se deben construir escenarios que reflejen las circunstancias específicas de una región. Siguiendo con la tónica de los autores, en el presente estudio se identificaron posibles proyecciones de reducción, dentro de los que el E2 es el que presentó un mayor potencial de reducción. Este escenario muestra la posibilidad de continuar con la inercia actual del PIB manufacturero de San Luis Potosí, pero bajo una creciente mejora en la intensidad energética y un cambio gradual hacia combustibles con menor carbonización (gas natural), logrando con ello una tasa de reducción del 42,15%, respecto a las emisiones generadas bajo un escenario tendencial.

Para analizar la factibilidad del E2, se observa que la variación del factor determinante del PIB a una TAV del 3,27% durante el periodo 2013-2020 tiene grandes posibilidades, dada la dinámica que ha mantenido el sector manufacturero estatal, que ya se mostró en la tabla 5.8).

Por otra parte, aunque el subsector de fabricación de maquinaria y equipo ha sido el más contribuyente en el PIB manufacturero, su participación en las emisiones de GEI ha sido baja, debido a que la energía requerida por este subsector es eléctrica principalmente, y térmica en mucho menor grado. En términos generales, los principales usos finales de la energía eléctrica son los sistemas de pintura (27-50%), la iluminación y las instalaciones de climatización (26-36%), aire comprimido (14,09%), y la soldadura (9,11%) (UN-Global Compact, 2012).

5.6 Conclusiones

La descomposición sectorial que se logró con la aplicación del LMDI en la identidad de Kaya, permitió observar que la dinámica de la variación de las emisiones no sigue una tendencia; en su lugar, se presentan cambios continuos que obedecen principalmente a la dinámica de los subsectores más demandantes en energía y cuyos combustibles son de alta carbonización; en este caso, nos referimos a los subsectores de productos minerales no metálicos, la industria alimentaria y la metálica básica.

La valiosa información que brinda el LMDI al proporcionar el efecto de cada factor determinantes en la variación de las emisiones, y de manera desagregada la contribución de cada subsector en términos de su aportación en las emisiones de CO₂, es una herramienta de gran valor que debería tomarse en cuenta para determinar con precisión hacia donde deben dirigirse las estrategias de reducción de emisiones; y una vez aplicadas, la misma metodología del LMDI puede indicar si

tales estrategias surtieron el efecto estipulado en el alcance de las metas de reducción.

Por otra parte, las proyecciones de las emisiones al 2020, bajo distintas combinaciones de los IV de los factores determinantes son una herramienta valiosa para contar con un panorama sobre el posible futuro de las emisiones bajo distintas condiciones de crecimiento económico, de avance tecnológico y cambios en la matriz energética; y sobre todo para identificar las condiciones de aquellos escenarios que conducen a la reducción de emisiones.

Las estrategias propuestas bajo los escenarios de mitigación, se perfilaron de acuerdo a las características particulares de los subsectores más contribuyentes tanto en las emisiones como en la variabilidad de las mismas. Al considerar las condiciones específicos de estos subsectores, se pretende que las estrategias propuestas sean lo más precisas y pertinentes posible para que su impacto conlleve un verdadero beneficio en la reducción de las emisiones de CO₂.

5.7. Referencias

Alcantara Escolano, V. (2009). Consumo energético y emisiones de CO₂ en la industria española. *Economía Industrial*(371), 49-57.

Alcántara Escolano, V. y Padilla Rosa, E. (2005). Análisis de las emisiones de CO₂ y sus factores explicativos en las diferentes áreas del mundo. *Revista de Economía Crítica*(4), 17-37.

Alcántara Escolano, V.by Padilla Rosa, E. (2010). Determinantes del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2007). *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1-15.

Alcántara, V. y López, S. (1996). "Sobre los factores explicativos del incremento del consumo mundial de energía". En F. La Roca, & A. Sánchez, *Economía crítica. Trabajo y medio ambiente* (págs. 231-240). Valencia, España: Universidad de Valencia.

Alves, M. y Moutinho, V. (2013). *Decomposition analysis for energy-related CO₂ emissions intensity over 1996-2009 in Portuguese Industrial Sectors*. University of Aveiro, Campus de Santiago. Aveiro, Portugal.

AMBIENTAL POCH. (2008). *Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero*. Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. Santiago, Chile.

ANC. (2011). *Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2002-2011*. Asociación Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. México, D. F.

Ang, B. W. (1999). Decomposition methodology in energy demand and environmental analysis. En J. C. vanden den Bergh, *Handbook of environmental and Resource Economies* (págs. 1146-1163). Edward Elgar Publishing Inc.

Ang, B. W. y Choi, K. H. (1997). Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method. *Energy Journal*, 18(3), 59-73.

Angelino, M. I. (2009). *Factores determinantes de los niveles de emisiones de CO₂ en países del cono sur de América Latina*. Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de Economía Política.

Arouri, E., Youssef, A., M'henni, H. y Rault, C. (2012). Energy consumption, economic growth and CO₂ emissions in Middle East and North African countries. *Energy Policy*, 45, 342-349.

Banco, m. (s. f.). *Crecimiento del PIB (%)*. Recuperado el 10 de Junio de 2014, de <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG/countries?page=6&display=default>.

Baumert, K. y Pershing, J. (2004). *Climate Data: Insights and Observations*. Pew Center on Global Climate Change. Arlington, VA, USA.

Blanch, J. J. (2004). *Posibles escenarios futuros mundiales de emisiones y absorciones de CO₂ y cumplimiento de los acuerdos de Kyoto*. Barcelona: Tesis doctoral en la Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Mecànica de Fluids.

Bonilla Cárdenasa, J. A. y Lemus Flores, C. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencia Pecuaria*(3), 215-246.

Boyd, G. A., McDonald, J. F., Ross, M. y Hanson, D. A. (1987). Separating the changing composition of US manufacturing production from energy efficiency improvement: a Divisia index approach. *Energy Journal*, 8(2), 77-96.

CANACEM. (2013). *Producción de cemento 2000-2012*. Cámara Nacional del Cemento. Recuperado el 14 de Agosto de 2012, de http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm.

CEADS. (2013). *Escenarios de Emisión de Gases de Efceto Invernadero Argentina 2012*. Consejo Empresario Argentino para el Desarrollo Sostenible. Buenos Aires, Argentina.

CEMEX. (2012). *El Manual del Constructor*. México, D. F.

CEPAL-ONU. (2010). *La economía del cambio climático en Centroamérica. Síntesis 2010*. México, D. F.

Chen, K., Yang, H., Ma, Z., Bi, Y. y Huang, L. (2013). Influence of temperature to the short-term effects of various ozone metrics on daily mortality in Suzhou, China. *Atmospheric Environment*(79), 119-128.

Chen, R., Pan, G., Zhang, Y., Xu, Q., Zeng, G., Xu, X., . . . Kan, H. (2011). Ambient carbon monoxide and daily mortality in three Chinese cities: The China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES). *Science of the Total Environment*(409), 4923-4928.

CONAMA. (2009). *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile.

CMM (2007). *Formulación de lineamientos de política en materia de eficiencia energética en sectores clave de la economía mexicana para el programa especial de cambio climático*. Centro Mario Molina. México.

Diakoulaki, D. y Mandaraka, M. (2007). Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO₂ emissions in the EU manufacturing sector. *Energy Economics*, 29(4), 636–664.

Dietz, T. y Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 94(1), 175-179.

Dlugokencky, E. J., Nisbet, E. G., Fisher, R. y Lowry, D. (2011). Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*(369), 2058–2072.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2010). Lista de combustibles que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como sus factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo. Secretaría de Energía. México. pp. 25.

Duro Moreno, J. y Padilla Rosa, E. (2006). *Análisis de los factores determinantes de las desigualdades internacionales en las emisiones de CO₂ per cápita aplicando el enfoque distributivo: una metodología de descomposición por factores de Kaya*. Barcelona, España.

Ehrlich, P. y Holdren, J. (1972a). Impact of population growth. (R. G. Riker, Ed.) *Population, Resources and the Environment*, 365-377.

Ehrlich, P. y Holdren, J. (1972b). A bulletin dialogue on the ;Closing Circle: Critique: One dimensional ecology. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 28(5), 16-27.

Etheridge , D. M., Steele, L. P., Francey, R. J., Barnola, J. M., Morgan, V. I. y Langelfelds, R. L. (1996). Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Geophysic*, 4115-4128.

Evans-Pughe, C. (2007). Sugar Rush. *Engineering & Technology*, 2(2), 38-42. Recuperado el 18 de agosto de 2014, de <http://web.ebscohost.com>

Feng, K., Hubacek, K. y Guan, D. (2009). Lifestyles, technology and CO₂ emissions in China: A regional comparative analysis. *Ecological Economics*, 69, 145–154.

Fernández González, P. (2012). *Técnicas de descomposición de variaciones basadas en índices de Divisia. Algunas aplicaciones medioambientales*. (Tesis inédita de doctorado). Universidad de Oviedo, Principado de Asturias, España.

Funk, T. H., Chinkin, L. R., Roberts, P. T., Saeger, M., Mulligan, S., P´aramo, V. H., y Yarbrough, J. (2001). Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *The Science of the Total Environment*(276), 135-151.

Galán Madruga, D. y Fernández Patier, R. (2006). Implicación de los NOx en la Química Atmosférica. *M+A. Revista Electrónica de Medio Ambiente*(2), 90-103.

Galindo, L. M. y Aroche, F. (2009). *Cambio climático y fundamentos económicos. El caso México*. Estudio elaborado para el Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.

Galindo, L. M. y Samaniego, J. L. (2010). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados. *Revista CEPAL*(100), 69-96.

IEH. (2010). *Proceedings of the 2010 Annual UK Review Meeting on Outdoor and Indoor Air Pollution Research, 13–14 April 2010 (Web Report W27)*. Institute of Environment and Health, Cranfield University, UK.

INEGI. (2000, 2004, 2010). *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Méx.

INEGI. (2005). *Sistema de Cuentas Nacionales. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa 1999-2004*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Méx.

INEGI. (2005, 2008). *La industria siderúrgica en México 2011. Serie estadísticas sectoriales*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags.

IPCC. (2000). *Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones*. Informe especial del Grupo de trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K.

Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley.

Januard, F., Bockel-Macal, S., Vuillermoz, J.C., Leurent, J. y Lebrun, C. (2006). Dynamic control of fossil fuel injections in EAF through continuous fumes monitoring. Recuperado el 10 de septiembre de 2014, de: http://www.americancombustion.com/file/otherelement/pj/3%208eec_2005_fumes48749.pdf

Lee, K. y Oh, W. (2006). Analysis of CO₂ emissions in APEC countries: A time-series and a cross-sectional decomposition using the log mean Divisia method. *Energy Policy*, 34(17), 2779–2787.

Lenton, T. M. y Vaughan, N. E. (2009). The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*(9), 5539-5561.

LGCC. (2012). Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación. *DOF 06-06-2012*.

Li, W. y Ou, Q.-X. (2013). Decomposition of China's Carbon Emissions Intensity from 1995 to 2010: An Extended Kaya Identity. Recuperado el 11 de Enero de 2014, de <http://dx.doi.org/10.1155/2013/973074>

Liu, L.-C., Fang, Y., Wu, G. y Wei, Y.-M. (2007). Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: An empirical analysis. *Energy Policy*, 35(11), 5892–5900.

McGraw, J., Haas, P., Young, L. y Evens, A. (2010). Greenhouse gas emissions in Chicago: Emissions inventories and reduction strategies for Chicago and its metropolitan region. *Journal of Great Lakes Research*, 36, 106-114.

McKibbin, Warwick J. y Stegman, Alison. (2005). Convergence and per capita carbon emissions. *International Economy Program*, (págs. 1-76). Canberra, Australia.

Minambiente. (2009). *Manual de Evaluación del Programa de Inventario de Emisiones*. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia.

Monks, P. S., Carpenter, L. J., Penkett, S. A., Ayers, G. P., Gillette, R. W., Galbally, I. E. y Meyer, C. P. (1998). Fundamental Ozone Photochemistry in the remote marine boundary layer: the SOAPEX experiment, measurement and theory. *Atmospheric Environment*, 32(21), 3647-3664.

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., . . . Zurek, M. (2008). *Exploración de nuevos escenarios para el análisis de las emisiones del cambio climático, de sus impactos y de las estrategias de respuesta*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra.

Nelson, G. C., Bennett, E., Berhe, A. A., Cassman, K., DeFries, R., Dietz, T., . . . Zurek, M. (2006). Anthropogenic Drivers of Ecosystem Change: an Overview. *Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art29/>*.

O'Mahony, T. (2013). Decomposition of Ireland's Carbon Emissions From 1990-2010: an Extended Kaya Identity. *Energy Policy*, 59, 573-581.

Parra Z., R., Apaza M., G. y Agramont A., A. (2010). Estimación de factores de emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales. *Revista Boliviana de Química*, 27(2), 81-88.

Prather, M. J., Holmes, C. D. y Juno, H. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*(32), 1-5.

Rivas Wyzykowska, A., Ramoni Perazzi, J. y Orlandoni Merli, G. (2013). Evaluación del impacto del crecimiento de la actividad humana en el medio ambiente: Identidad de Kaya aplicada a Venezuela (1990-2006). *Agroalimentaria*, 19(37), 127-145.

Sahu, S. y Narayanan, K. (2010). Decomposition of Industrial Energy Consumption in Indian Manufacturing: The Energy Intensity Approach. *"Frontier Issues in Technology, Development and Environment"*, (págs. 1-29). Mumbai, India.

Samaniego, J. L. y Galindo, L. M. (2009). Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a combustibles fósiles y cemento en América Latina. *Economía Informa*(360), 40-66.

Sandoval Garcia, E. R. (2013). Proyección sobre la energía eléctrica en México mediante la Identidad de Kaya. *Economía Informa*(380), 41-53.

Schlatter, T. W. (2009). *Atmospheric Composition and Vertical Structure*. Boulder, Colorado, USA. Recuperado el 12 de Mayo de 2014, de http://ruc.noaa.gov/AMB_Publications_bj/2009%20Schlatter_Atmospheric%20Composition%20and%20Vertical%20Structure_eae319MS-1.pdf

SDE. (2010). *Panorama Económico del Estado de San Luis Potosí Cuarto Trimestre 2010*. Secretaría de Desarrollo Económico. San Luis Potosí, Méx.

SEDECO. (2010). *Programas sectoriales 2010-2015. Eje 2 Economía competitiva y generadora de empleos*. Secretaría de desarrollo económico. Gobierno del estado de San Luis Potosí. San Luis Potosí.

SEMARNAT-INE. (2005). *Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones*. México, D. F.

SEMARNAT-INE. (2012). *México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México, D. F.: Grupo Communicare, S.C.

SEMARNAT-INECC. (2013). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas*. México, D. F.

SENER-AIE (2011). *Indicadores de eficiencia energética: 5 sectores 5 retos*. Secretaría de Energía en colaboración con la Agencia Internacional de Energía. México.

SENER (2013). *Prospectiva del gas natural y gas L.P. 2013-2027*. Secretaría de Energía. México.

Song, M., Wang, S., Yu, H., Yang, L. y Wu, J. (2011). To reduce energy consumption and to maintain rapid economic growth: Analysis of the condition in China based on expended IPAT model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 5129–5134.

Szép, T. S. (2013). Eight Methods for Decomposing the Aggregate Energy Intensity of the Economic Structure. *'Club of Economics in Miskolc'*, 9(1), 77-84.

Taghavi, M., Cautenet, S. y Arteta, J. (2005). Impact of a highly detailed emission inventory on modeling accuracy. *Journal of Atmospheric Research*(74), 65-88.

Tans, P. (2009). An accounting of the observed increase in oceanic and atmospheric CO₂ and an outlook for the future. *Oceanography*, 22(4), 26-35.

Tapia Granados, J. A., Edward, L. I. y Carpintero, O. (2012). Climate change and the world economy: short-run determinants of atmospheric CO₂. *Environmental Science and Policy*(21), 50-62.

Taylor, M., Tam, C. y Gielen, D. (2006). Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry. Paper prepared for the IEA-WBCSD workshop: Energy efficiency and CO₂ emission reduction potentials and policies in the cement industry, IEA, Paris, 4-5 September 2006.

USA-EPA. (2013). *Emission Inventory*. Recuperado el 15 de diciembre de 2013, de http://www.epa.gov/air/aqportal/management/emissions_inventory/.

US-EPA. (2007). *Emissions Factor Uncertainty Assessment*. NC, USA.

US-EPA. (s.f.). *Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Recuperado el 12 de Marzo de 2013 de: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>.

Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., Ramshaw, C. y Yeung, H. (2011). Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1609-1624.

Yeh, A. C., Bai, H. (1999). Comparison of Ammonia and Monoethanolamine solvents to reduce CO₂ greenhouse gas emissions. *Science of the Total Environment*, 228, 121-133.

Yeh, J. T. y Pennline, H. W. (2004). Absorption and regeneration studies for CO₂ capture by aqueous Ammonia. *Third Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration* May 3-6, 2004 Alexandria, VA.

York, R., Rosa, E. A. y Dietz, T. (2002). Bridging Environmental Science with Environmental Policy: Plasticity of Population, Affluence, and Technology. *Social Science Quarterly*, 83(1), 18-34.

Yue, T., Long, R., Chen, H. y Zhao, X. (2013). The optimal CO₂ emissions reduction path in Jiangsu province: An expanded IPAT approach. *Applied Energy*, 112, 1510-1517.

Zhao, M., Tan, L., Zhang, M., Liu, Y. y Yu, L. (2010). Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method. *Energy*, 35(6), 2505–2510.

Zhao, Y., Nielsen, C. P. y McElroy, M. B. (2012). China's CO₂ emissions estimated from the bottom up: Recent trends, spatial distributions, and quantification of uncertainties. *Atmospheric Environment*, 59, 214-223.

Zilio, M. (2008). Emisiones de dióxido de carbono en América Latina. Un aporte al estudio del cambio. *Economía y Sociedad*, XIV(22), 133-161.

Capítulo 6. Estrategias de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero

Resumen

Para proponer estrategias de mitigación de emisiones de CO₂ congruentes a la realidad de cada región o localidad, se debe tomar en cuenta la dinámica de las fuentes clave de tales emisiones. En este capítulo se identificaron y se analizaron las acciones de mitigación para los subsectores más contribuyentes de las emisiones de CO₂ del sector manufacturero de San Luis Potosí. Se eligieron aquéllas iniciativas que, dadas las condiciones del sector en estudio, fueron las más pertinentes, y se realizaron proyecciones para identificar el potencial de mitigación con cada alternativa elegida.

6.1 Introducción

La gran contribución de los combustibles fósiles como fuente de energía en las diferentes actividades humanas, así como su dinámica temporal, se ha reflejado en las emisiones de CO₂. Entre 1971 y 2012, las emisiones mundiales generadas por la quema de estos energéticos se han duplicado, al pasar de 15 633 Mt de CO₂ a 31 734 Mt (IEA, 2014).

Los estudios relacionados con la identificación de los factores determinantes de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustibles han cobrado gran importancia en las últimas décadas (Galindo y Aroche, 2009; Arouri, Youssef, M'henni y Rault, 2012). Uno de los principales propósitos de llevar a cabo estos estudios es para conocer los posibles escenarios futuros de las emisiones de este gas, y con base en ello, proponer las estrategias y metas de reducción más pertinentes (Sandoval, 2013; CEADS, 2013).

Un aspecto de gran interés para los usuarios de escenarios es el desarrollo de escenarios socioeconómicos con un mayor grado de detalle a nivel regional, subregional y sectorial que sean coherentes con los escenarios mundiales, pero que reflejen también las particularidades de las condiciones locales (IPCC, 2000). Esto es de especial importancia, ya que la adopción de opciones de adaptación y de mitigación a nivel nacional, regional o sectorial deben sustentarse en las condiciones reflejadas en escenarios de emisiones construidos a esa misma escala (Moss et al., 2008).

Un hecho importante es que las estrategias elegidas para reducir las emisiones de CO₂ deben tomar en cuenta las características particulares de la dinámica económica de cada región o país en cuestión. Además, se debe elegir el enfoque bajo el que se deben llevar a cabo éstas acciones; uno basado en sectores puede ser más factible y manejable que un enfoque de país. Por ejemplo, un par de sectores clave como la generación de electricidad y otro de los principales sectores industriales, pueden explicar la mayoría de las emisiones en muchos países; esto puede ayudar para que los responsables de políticas y los inversionistas se centren en la áreas críticas para la reducción de emisiones (Wang et al., 2007).

Con el propósito de proponer estrategias pertinentes de mitigación, según las características de la dinámica del sector manufacturero de San Luis Potosí, el objetivo del presente capítulo es detectar y analizar las estrategias de reducción de emisiones de CO₂ que se han llevado a cabo en distintos países, localidades o industrias, para seleccionar y proponer aquéllas que, dadas las condiciones del sector en estudio, sean las más congruentes con los subsectores manufactureros que resultaron más contribuyentes en las emisiones estatales de CO₂.

6.2 Antecedentes

Después del acuerdo sobre la meta de un calentamiento global máximo de 2° C hacia fines del presente siglo, propuesto en el contexto de las negociaciones multilaterales de la CMNUCC en Cancún en el 2010, varias naciones iniciaron estudios para estimar la cantidad de emisiones que pueden reducir o evitar bajo la implementación de acciones de mitigación, en comparación con la tendencia y la tecnología actuales; es decir, realizaron estudios para conocer su potencial de mitigación de emisiones, con base en escenarios; y con ésto establecieron propuestas de acciones de reducción (IPCC, 2007; Anderson et al., 2008; Agnolucci et al., 2009).

Dentro de las acciones de reducción de emisiones de GEI, las estrategias más señaladas se dirigen hacia la disminución en el uso de energía a través de prácticas o tecnologías que incrementen la eficiencia energética, seguida por la recomendación del reemplazo de combustibles más limpios (Kaya y Yokobori, 1997; Taylor et al., 2008; INECC, 2012). Por otro lado, las sugerencias de algunas organizaciones incluyen acciones sectorizadas, perfiladas hacia cada una de las categorías de fuentes de emisión incluidas en los inventarios de emisiones de GEI; las estrategias que proponen son para incrementar la eficiencia energética, hacer uso de tecnologías y fuentes de energía más limpias, mejoras en la gestión de: los bosques, los residuos del ganado, los rellenos sanitarios, y del tratamiento de aguas residuales (IPCC, 1996; CEPAL-ONU, 2010).

La eficiencia energética, concebida por la SENER (2014) como “todas las acciones que conlleven a una reducción económicamente viable de la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que requiere la sociedad”, es favorable con las estrategias para mejorar el medio ambiente, ya que reduce el requerimiento de energía; sin embargo, otro atractivo de muchas medidas de eficiencia energética es su costo efectividad. Los costos varían

entre las tecnologías y los países donde las medidas se implementan, pero con frecuencia son sólo entre una cuarta parte y la mitad de los costos comparables de adquisición de suministro adicional de energía (Taylor et al., 2008).

De acuerdo a la IEA (2006), muchos procesos tienen muy baja eficiencia energética y el uso de energía promedio es mucho más alto que el permitido por la mejor tecnología disponible. Los principales factores que afectan a la eficiencia energética de las plantas industriales son: la selección y optimización de la tecnología, los procedimientos de funcionamiento y mantenimiento, y la utilización de la capacidad, que es la fracción de la capacidad máxima a la que el proceso está funcionando. Todo esto propicia una gran oportunidad para reducir el consumo de energía y sus emisiones de CO₂ correspondientes. Por ejemplo, las prácticas de mantenimiento general de las plantas más antiguas y menos eficientes puede producir ahorros de energía de 10 a 20%; y otras medidas de bajo costo, tales como la optimización de la eficiencia de combustión, la recuperación y el uso de gases de escape, el uso de motores de alta eficiencia eléctrica, pueden generar un ahorro energético del 20-30% (IPCC, 2007).

Las inversiones en eficiencia energética pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al tiempo que se logra un ahorro económico a los consumidores. Por ejemplo, se estima que si los usuarios finales de energía eléctrica instalaran lámparas eficiente, balastras y controles, la demanda mundial de electricidad para iluminación se reduciría sustancialmente y sería casi la misma desde los niveles de 2005, para el año 2030; con esto se evitarían US\$ 2,6 billones en el gasto total de la iluminación a través de la reducción de los costos energéticos y de mantenimiento, y se evitarían más de 16 000 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono (IEA, 2006).

Según la IEA, el aumento de la eficiencia energética es la forma más rápida y menos costosa de abordar la seguridad energética, los retos medioambientales y

económicos. Considerando esto, la Agencia desarrolló en el 2008 un conjunto de veinticinco políticas de eficiencia energética. En lo referente al sector industrial, la sugerencia es que los gobiernos deben exigir a la gran industria de uso intensivo de energía, y alentar a otros usuarios industriales de energía, para que se ajusten a la norma ISO 50001 o algún protocolo similar de gestión de energía; para lo cual indica que las medidas de gestión de la energía deberían incluir: la identificación y evaluación de oportunidades de ahorro de energía, la implementación de acciones para aprovechar el ahorro de energía identificado, e informar públicamente las oportunidades de ahorro de energía identificadas y las medidas adoptadas para llevarlas a cabo. La Agencia también recomienda que los gobiernos deben desarrollar e implementar un paquete especial de políticas y medidas destinadas a promover la eficiencia energética en las pymes (pequeñas y medianas empresas). Otra de las políticas es que los gobiernos deben apoyar las mejoras en la eficiencia industrial, mediante la eliminación de subsidios a la energía y la internalización de los costos del medio ambiente, proporcionando incentivos específicos que garanticen el acceso para financiamiento (IEA, 2011).

Por otra parte, se encuentra la posibilidad de implementar equipos de control de emisiones de CO₂. Entre las alternativas para extraer el CO₂ de los efluentes gaseosos se encuentran: absorción química, métodos de adsorción, membranas de separación, fijación biológica, entre otros (Niu et al., 2012). Los métodos de absorbentes químicos son, hasta el momento, los más eficientes en la captura del CO₂. En estos procesos se hace reaccionar al CO₂ con un disolvente químico para formar un compuesto intermedio débilmente unido que puede ser regenerado con la aplicación de calor, produciendo el disolvente original y un flujo relativamente puro de CO₂ (IPCC, 2005), que posteriormente puede almacenarse.

Antes de elegir las estrategias para reducir las emisiones de CO₂, se deben tomar en cuenta las características particulares de la dinámica económica de cada región o país en cuestión, así como las fuentes clave de emisión. Además, debe

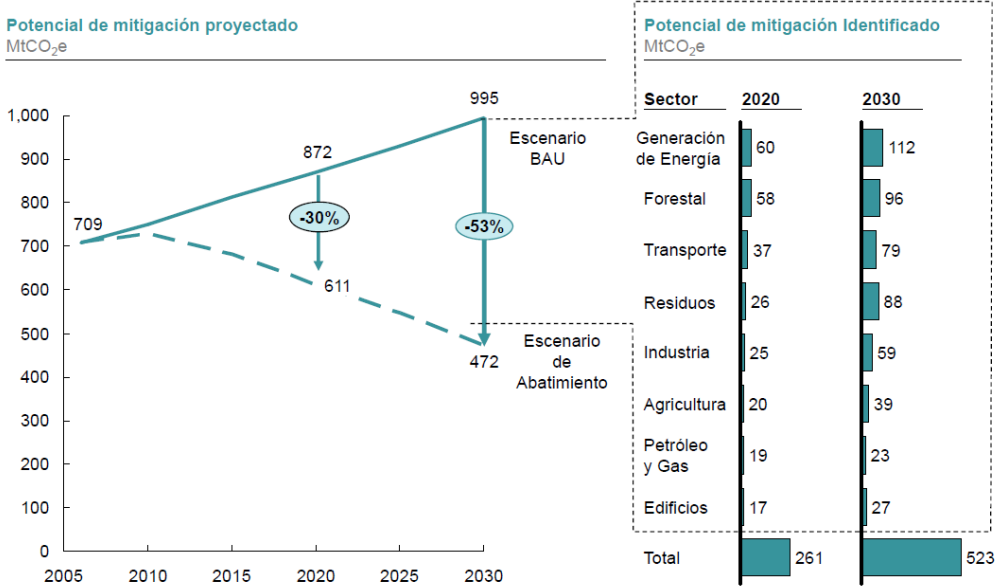
seleccionarse el enfoque bajo el que cual se deben llevar a cabo éstas acciones; uno basado en sectores puede ser más factible y manejable que un enfoque global de país.

Por lo anterior, en Brasil, las actividades de mitigación deben dirigirse, en su mayoría, a las prácticas agrícolas, de uso de suelo y forestales; éstos subsectores, junto al uso de combustibles del sector industrial, son las categorías de fuentes de emisión principales de CO₂. La matriz energética de este país es una de las más limpias a nivel mundial, en la que domina la participación de las energías renovables con un 43% de la oferta total de energía. En el sector de energía, el 81% de la generación de electricidad se obtiene de plantas hidroeléctricas, evitando con esto la liberación de una gran cantidad de CO₂ (IEA, 2013). Por su parte, el sector industrial participa con el 35% de las emisiones derivadas por el uso de combustibles fósiles en el país; debido a esta contribución significativa, el sector privado ha llevado a cabo proyectos para reducir la intensidad energética y las emisiones de CO₂, a través de acciones encaminadas a disminuir los costos de energía, lograr ganancias de productividad y una mejor competitividad (Taylor et al., 2007). Además, se ha detectado que el sector industrial brasileño tiene un gran potencial para reducir sus emisiones, a partir de la adopción de medidas de eficiencia energética como el reciclaje de materiales, el reemplazo de diferentes combustibles, el uso de fuentes renovables y la reducción del uso de la biomasa procedente de la deforestación (Henriques et al., 2010).

En países como China, que es uno de los grandes contribuyentes en las emisiones mundiales de GEI (21% en el 2005), y que además presenta un crecimiento económico acelerado correlacionado con el consumo de energía, la implementación de estrategias perfiladas a incrementar la eficiencia energética son fundamentales (IEA, 2013). De hecho, el gobierno de este país anunció la meta ambiciosa de reducir entre un 40% a 45% el uso de energía por unidad de PIB de los niveles del 2005 para el 2020, por lo que las medidas de implementación más efectivas serán

en el terreno de la eficiencia energética (Taylor et al., 2007; Li y Ou, 2013). Por ejemplo, en el sector de generación de electricidad se están llevando a cabo tareas de reemplazo de equipo; para lo cual se otorgó una concesión al grupo Siemens para la fabricación e instalación de turbinas mucho más eficientes que las reemplazadas; sin embargo, se siguen construyendo plantas generadoras que usan carbón (Jones, 2013).

Por su parte, México se ha comprometido a reducir sus emisiones del 2020 en un 30% respecto a su escenario tendencial (BaU, Business as Usual), el cual se elaboró a partir del Inventario de emisiones de GEI de 2006, de las estimaciones sobre la tasa de crecimiento demográfico, y la tasa anual de crecimiento compuesto (TACC) de los sectores de la economía mexicana. Bajo el escenario tendencial al 2020, las emisiones de GEI generadas en México podrían alcanzar 872 MtCO₂e; y bajo un escenario de reducción en el que se considera el potencial de mitigación, éstas mismas podrían ser 611 MtCO₂e (Gráfica 6.1).



Gráfica 6.1. Potencial de mitigación de las emisiones de CO₂e de México al 2020 y 2030 (INE-SEMARNAT, 2010).

Según el INE-SEMARNAT (2010), para que México logre las metas establecidas requerirá de apoyo financiero internacional. Según los análisis realizados, de las 261 MtCO_{2e} que pueden abatirse al 2020, 111 MtCO_{2e} se podrán lograr con recursos propios, a través de iniciativas de abatimiento dirigidas a todos los sectores. Entre estas medidas se encuentran:

- a) Mayor penetración de algunas energías renovables en la generación de energía eléctrica del país, como pequeñas hidroeléctricas.
- b) Mejoras de eficiencia energética en hogares y edificios comerciales al sustituir focos incandescentes por fluorescentes o de LEDS.
- c) Mejoras de eficiencia energética en el sector industrial, así como cogeneración en el sector de petróleo y gas.
- d) Aplicación de normas y estándares de eficiencia para vehículos nuevos, y para un mejor control en la importación de vehículos importados.
- e) Aprovechamiento y/o quema de gas en rellenos sanitarios.
- f) Cambios en prácticas agrícolas, tales como un mejor manejo de nutrientes en tierras de cultivo, así como mejores prácticas de labranza y gestión de residuos.

Para el resto del potencial identificado, equivalente a 150 MtCO_{2e}, México requerirá de soporte financiero internacional. El apoyo deberá dirigirse a la adquisición de infraestructura y transferencia de tecnología, así como al desarrollo de capital humano. Entre las iniciativas para aprovechar este potencial se encuentran:

- a) Mayor penetración de energía eólica y solar en la generación de electricidad.
- b) Reforestación, aforestación y reducción en la deforestación.
- c) Modernización y mejoras en el transporte público.

d) Implementación de sistemas de generación eléctrica distribuidas.

A partir del análisis de diversas iniciativas, se identificaron más de 150 proyectos con un potencial de abatimiento total estimado en 130 MtCO₂e anuales al 2020; esto es la mitad del compromiso adquirido por México para ese año. El mayor potencial de abatimiento de estos proyectos (92 MtCO₂e 70% del total de la cartera) se concentra en los sectores forestal y agropecuario, petróleo y gas, y eficiencia energética.

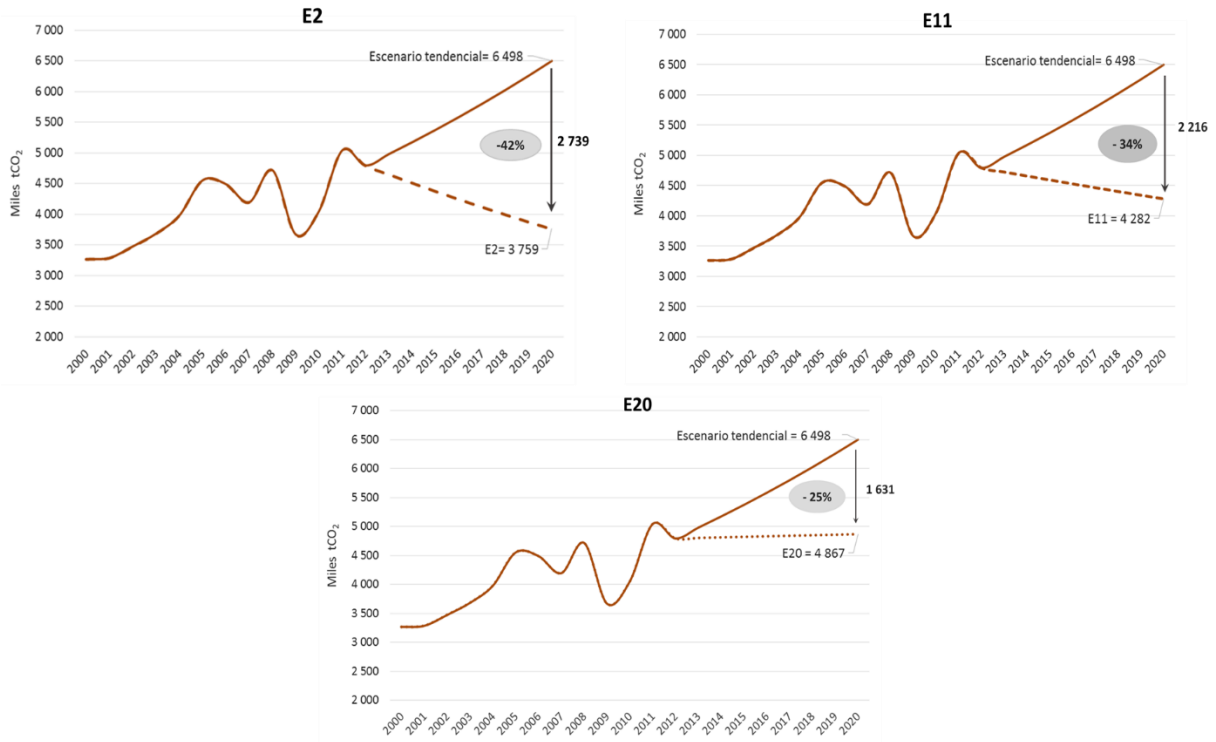
A escala estatal, en México se han presentado varias propuestas de mitigación de GEI, como parte de los distintos Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). Dentro de las iniciativas para la mitigación en el sector industrial, la mayoría se dirigen a mejoras en la eficiencia energética. Por ejemplo, en el estado de Hidalgo se propone el uso de motores y tecnologías de mayores rendimientos, el uso adecuado de los motores según su tamaño y requisitos de carga, el mantenimiento y reparación de los sistemas y mecanismos a través del remplazo de dispositivos ineficientes. Por su parte, en Guanajuato se plantea potenciar los programas de Industria Limpia y fortalecer el cumplimiento de la legislación; así como la incorporación de sistemas de aislamiento, ventilación, filtración de aire y de aire acondicionado, en instalaciones con tecnologías de punta y en la industria alimentaria.

Por su parte, con el propósito de proponer estrategias pertinentes de mitigación para el sector industrial manufacturero de San Luis Potosí, en el presente capítulo se analizan las estrategias de reducción de emisiones de CO₂ que se han llevado a cabo en distintos países, localidades o industrias, para seleccionar y proponer aquellas que sean las más congruentes con los subsectores manufactureros que resultaron más contribuyentes en las emisiones estatales de CO₂, con el propósito de aprovechar el potencial de mitigación detectado en los escenarios elaborados en el capítulo anterior.

De acuerdo a los resultados del inventario de emisiones de GEI que se mostraron en el capítulo 2, las categorías que presentaron las principales contribuciones en las emisiones absolutas de GEI fueron: cemento con un 39%, hierro y acero con un 26%, y alimentos y bebidas con 19%; por esto, las sugerencias para la reducción de emisiones futuras se perfilarán hacia estos subsectores. Asimismo, del análisis de los factores determinantes por cada subsector manufacturero bajo la metodología LMDI que se mostró en el capítulo 5, los giros de mayor efecto en la variabilidad anual de las emisiones de CO₂ fueron: fabricación de minerales no metálicos, la industria alimentaria y la industria metálica básica.

Además, para considerar el potencial de mitigación de 2 739 205 tCO₂ que presentó el escenario E2 o las 2 216 476 toneladas del E11, así como la posibilidad de mitigar las 1 631 214 tCO₂ según la proyección del E20 (Gráfica 6.2), las medidas de mitigación deberán dirigirse hacia estrategias que impacten en la eficiencia energética y al reemplazo de combustibles por otros de menor carbonización. Para analizar la posibilidad de la adopción paulatina de la matriz energética hacia el uso de gas natural, como lo sugiere el escenario E2, primero se deben tener en cuenta los requerimientos de energía por parte de los subsectores antes mencionados. Del total de la energía consumida durante el periodo observado 2000-2012, la industria metálica básica consumió en promedio el 42,39%, la fabricación de productos minerales no metálicos el 27,04% y la industria alimentaria el 19,02%.

De forma más desagregada, de la energía consumida por la industria metálica básica, cerca del 70% proviene del uso de GLP que aún se utiliza en varias empresas de este giro industrial. En la fabricación de productos minerales no metálicos, el 62% de la energía consumida se obtiene por el uso de coque de petróleo en la fabricación de cemento; y en la industria alimentaria, el 83,08% se obtiene por la quema de bagazo de caña en la producción de azúcar.



Gráfica 6.2. Potencial de mitigación de emisiones de CO₂ según los escenarios E3, E11 y E20.

De los combustibles antes mencionados, el coque de petróleo y el bagazo de caña son utilizados en procesos y empresas ampliamente conocidos, por lo que la adopción del uso de combustibles de menor carbonización y el incremento de la eficiencia energética debe dirigirse, en primera instancia, a estos procesos.

6.3 Metodología

Para proponer las estrategias de mitigación de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustibles en el sector manufacturero de San Luis Potosí, se llevó a cabo una revisión exhaustiva en distintas fuentes, para analizar las propuestas y acciones que se han considerado en los sectores manufactureros que se

identificaron como más contribuyentes en las emisiones de CO₂, de acuerdo a los análisis realizados en capítulos anteriores.

Se llevó un análisis cualitativo para comparar las acciones y propuestas revisadas con respecto a la situación actual de cada uno de los subsectores analizados. Aunque se identificaron múltiples y diversas estrategias, se consideraron solo aquellas que resultaron congruentes o equiparables a las características del sector en cuestión.

Una vez que se identificaron las posibles estrategias de reducción, se llevaron a cabo simulaciones, con base a los escenarios futuros realizados en el capítulo anterior, para analizar el impacto de tales estrategias, en relación a su potencial de mitigación de emisiones de CO₂.

Análisis de estrategias de mitigación para los subsectores más contribuyentes en las emisiones de CO₂ del sector manufacturero

6.3.1 Estrategias de mitigación de emisiones de CO₂ en la producción de cemento

Las emisiones de CO₂ en una industria de cemento provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles y de la calcinación de la piedra caliza para producir el clinker; además, una cantidad indirecta de CO₂ proviene del consumo de electricidad (Ali, Saidur y Hossain, 2011). Aproximadamente, se generan 0,97 tCO₂ por cada tonelada de clinker; y en promedio, se utilizan alrededor de 900 kg de clinker en cada 1 000 kg de cemento (McCaffrey, 2001). La principal fuente de emisión de CO₂ en la fabricación de cemento se centra en la producción de clinker, tanto por los combustibles utilizados para tal efecto, como por la descarbonatación de la piedra caliza.

Las emisiones totales de CO₂ durante la producción de cemento dependen, principalmente, del tipo de proceso de producción (la eficiencia del proceso), el combustible utilizado (carbón, combustóleo, gas natural, coque de petróleo,

combustibles alternativos), y la proporción de clínker/cemento (porcentaje de aditivos). Por esto, las acciones encaminadas a la reducción de las emisiones deben enfocarse en estos rubros. En términos generales, las estrategias pueden agruparse como sigue: mejoras de la eficiencia energética del proceso, la sustitución de combustibles altos de carbono por otros de menor carbonización, reducción de la proporción clínker/cemento, aplicación de cementos alternativos (polímeros minerales), y la captura y secuestro (almacenamiento) de CO₂ de los gases de combustión (Hendriks et al., 2004).

Mejora de la eficiencia energética del proceso

Las mayores oportunidades en la reducción del consumo de energía y de las emisiones asociadas a la producción del cemento se obtendrán con mejoras en el proceso de calcinación. En promedio, en Estados Unidos estos sistemas operan con una eficiencia térmica de, aproximadamente, el 34%. Esto implica que hay mejoras potencialmente significativas en los procesos y sistemas para optimizar el rendimiento energético.

El tipo de proceso en la producción de cemento influye de forma significativa en la eficiencia energética del mismo. Un proceso seco consume alrededor del 13% menos de energía eléctrica y 28% menos de combustible que el proceso húmedo (Ali et al., 2011). Cabe resaltar que la industria del cemento en México es de las de mayor eficiencia energética a nivel mundial debido, en gran parte, a que utiliza únicamente procesos secos para su producción (CMM, 2007). Por otra parte, mientras el promedio mundial de carbonización fue 0,81 kg CO₂/kg clínker, en México, durante el 2005, este índice resultó en 0,73 kg CO₂/kg clínker (CMM, 2007). Hendriks et al. (2004) proponen las principales opciones para mejorar la eficiencia energética en la producción de cemento, entre las que se encuentran los sistemas de control de procesos automatizado, la conversión de proceso seco a horno con pre calcinador, mejoras en la etapa del precalentamiento, entre otras (Tabla 6.1).

Sustitución de combustibles de alto carbono por combustibles bajos en carbono

Más del 90% de la energía utilizada en la producción de cemento proviene del uso de combustibles, tanto de forma directa como por los requerimientos de energía eléctrica. Una opción principal para reducir las emisiones de dióxido de carbono es el reemplazo hacia combustibles de baja carbonización, por ejemplo, desplazamiento del carbón por el gas natural. Otra posibilidad para reducir las emisiones es la aplicación de combustibles alternativos como biomasa o residuos (neumáticos usados, madera, plásticos, disolventes, residuos sólidos urbanos); esto podría disminuir al mismo tiempo los materiales de desecho y los costos por el menor uso de combustibles fósiles; sin embargo, presentan la desventaja de posibles efectos adversos en la calidad del cemento y el aumento de emisión de gases nocivos (Taylor, 2006).

Por otro lado, la utilización de combustibles alternativos de desechos no mejora directamente la eficiencia energética o disminuye las emisiones de CO₂ de la producción de cemento. Dependiendo del combustible alternativo utilizado, se puede argumentar un ahorro de energía indirecto real y la reducción de emisiones; sin embargo, la colocación de un valor cuantitativo en este ahorro indirecto de energía y reducción de emisiones es problemática (Choate, 2003).

Reducción de la relación clínker / cemento (aumento de la relación aditivos / cemento): cementos mezclados

El 60% de la emisiones en el proceso de fabricación del cemento se generan por la descarbonatación de la piedra caliza, por lo que la práctica más común de mejorar la eficiencia energética no es factible, en su lugar, la única opción posible es el uso de materiales sustitutos del clínker o que la proporción cemento/clínker se reduzca.

Tabla 6.1. Alternativas de mejoramiento de la eficiencia energética en el proceso productivo del cemento. Elaboración propia con datos de Hendriks et al. (2004).

Técnica	Descripción	Reducción emisión/ mejora energética
Sistemas de control del proceso	El control automatizado por computadora puede ayudar a optimizar el proceso y las condiciones de la combustión.	Típicamente 2,5 – 5 %.
Sistemas de homogenización de materia prima	Uso de la gravedad para la homogenización de la materia prima.	Reducción de la energía usada, entre 1,4 – 4 kWh/t clinker.
Conversión de proceso seco a horno con precalentamiento en multi-etapas	Cuatro o cinco etapas de precalentamiento reduce pérdidas de calor, y a veces reduce la caída de presión.	Dependiendo del proceso original, se puede reducir de 3,9 a 3,4 GJ/ t.
Conversión de proceso seco a horno con pre calcinador	Incremento de capacidad y reduce el uso específico de combustible.	Dependiendo del proceso original, se estima un 12% (0,44 GJ/t).
Conversión a enfriadores de rejilla	Mayor capacidad y recuperación eficiente del calor.	Reducción de 0,1 – 0,3 GJ/t (incremento de la energía en 3 kWh/t).
Mejora del precalentamiento (horno de LEPOL)	Materia prima precalentada en un horno de dos etapas.	Ahorro de combustible de 6,3% (para 3,3 GJ/t). 1 % menos en el uso de energía.
Optimización de la recuperación de calor en el enfriador de clinker	Mejoras en la recuperación de calor por la reducción del volumen de aire de exceso.	Estimados 0,2 y 0,5 GJ/t.
Motores e impulsores de alta eficiencia	Impulsores de velocidad variable y motores de alta eficiencia mejoran el control del proceso.	Ahorro energético estimado de 3% a 8%.
Tecnologías eficiente de moliendas	Los molinos de alta presión mejoran la molienda.	Estimado en 16 – 19 kWh/t (40-50%).
Separadores de alta eficiencia	El material permanece más tiempo en el separador, permitiendo una separación más fina reduciendo la sobremolienda.	Estimado en 1,7 – 2,3 kWh/t cemento (8%).
Polímeros minerales	Los polímeros minerales son hechos de silicatos de aluminio.	Se estima una reducción de 5 a 10 veces el consumo de energía y las emisiones.

La reducción de la cantidad de clinker en el cemento mezclado puede ser considerada como una de las formas más eficaces para reducir las emisiones de CO₂. Se han realizado estudios que muestran que la mezcla de cemento con aditivos para reemplazar clinker tiene la más notable contribución en la reducción de las emisiones de CO₂ (Ali, et al., 2011).

Los materiales que se pueden agregar al cemento para ampliar su volumen sin una pérdida significativa de propiedades se conocen como "puzolanas." Estos compuestos pueden combinarse con cal hidratada para formar otros más estables; y, dependiendo del tipo de puzolana elegida, la densidad y la resistencia a la compresión del concreto formado se pueden aumentar, y reducir su porosidad (Taylor et al., 2006). Además, el potencial mundial de reducción de emisiones de CO₂ a través de la mezcla de cemento se estima en al menos 5% de las emisiones totales de CO₂ de la producción de cemento; por ejemplo, una adición de aproximadamente 10% cenizas volantes al cemento reduciría sustancialmente las emisiones anuales de CO₂. También los materiales como la piedra caliza, escoria de alto horno, puzolanas naturales, humos de sílice y ceniza volcánica se pueden usar como aditivos (Ali et al., 2011).

Los materiales puzolana, en general, no requieren calcinarse y, por lo tanto, se pueden ahorrar cantidades significativas de energía y generar menos emisiones. Las ventajas económicas y ambientales de la adición de puzolana parecen indicar que su uso regular y de alto volumen se convertirá en una práctica habitual en la industria del concreto (Choate, 2003).

Captura y secuestro (almacenamiento) de CO₂ de los gases de combustión

Entre las alternativas para extraer el CO₂ de los efluentes gaseosos se encuentran: absorción química, métodos de adsorción, membranas de separación, fijación biológica, entre otros (Niu et al., 2012). Los métodos de absorbentes químicos son, hasta el momento, los más eficientes en la captura del CO₂. Estos implican la

reacción de CO₂ con un disolvente químico para formar un compuesto intermedio débilmente unido que puede ser regenerado con la aplicación de calor, produciendo el disolvente original y un flujo relativamente puro de CO₂ (IPCC, 2005).

Dentro de los absorbentes químicos más utilizados están las aminas, como la monoetanolamina (MEA). En este proceso el CO₂ generado en el afluente gaseoso reacciona con la MEA para formar un solvente intermedio, que posteriormente se calienta para regenerar la MEA y re utilizarla. Este proceso requiere que el flujo de las emisiones de CO₂ alcance una temperatura entre los 45–50°C, para mejorar la absorción del gas y evitar la evaporación de la amina (Wang et al., 2011). Además, se requiere que previamente se apliquen técnicas para la remoción de los gases ácidos como el SO₂ y NO₂ contenidos en el afluente gaseoso, debido a que éstos pueden reaccionar formando sales con la MEA, reduciendo la capacidad de absorción de la amina y haciendo difícil su recuperación (Pellegrini et al., 2009). Por otra parte, a pesar de que los métodos de solventes químicos son los más efectivos, los costos para separar el CO₂ son altos, normalmente, entre los 150 dólares por tonelada de carbón (Hoyos et al., 2008).

Debido a los altos costos de remoción del CO₂ con la MEA, se han experimentado alternativas con otros agentes de absorción. Un reactivo sustituto es el amoníaco (NH₃), cuya capacidad de absorción es, aproximadamente, 1,20 kg CO₂/kg NH₃, mientras que para la MEA es de 0,40 kg CO₂/kg MEA (Yeh y Bai, 1999). El producto principal del proceso con NH₃ es el bicarbonato de amonio, que tiene propiedades de fertilizante, por lo que puede ser aprovechado como tal (Niu et al., 2012). Con el proceso de amoníaco acuoso se puede capturar el SO₂, NO₂ y CO₂, por lo que no se requieren procesos previos para la remoción de los dos primeros gases ácidos; y no se presentan problemas de degradación del absorbente, ni efectos de corrosión del equipo. Además, con este absorbente se requiere menos suministro energético, en comparación con la MEA, que demanda grandes cantidades de energía durante

el proceso de recuperación de la amina; y el precio de venta del NH_3 es cerca de una sexta parte el de la MEA (Yeh y Pennline, 2004).

Una vez que se ha utilizado alguna técnica de las antes mencionadas para capturar el CO_2 , éste se concentra, se transporta y es secuestrado bajo tierra o en el océano profundo. Este proceso, conocido como Captura y Secuestro (almacenamiento) de Carbono (CCS, por sus siglas en inglés), puede convertirse en un enfoque emergente de reducción. Se ha reportado que la aplicación de esta técnica puede alcanzar reducciones de CO_2 entre 65-70% (Ali et al., 2011).

Como se observa de lo anterior, la recuperación o absorción del CO_2 de los efluentes gaseosos es un proceso relativamente nuevo que, como se explicó, el más utilizado de estos (absorción química con MEA), presenta varias desventajas, entre las que destacan los altos costos y requerimientos de energía; por lo que su implementación requiere de un riguroso análisis de costo-beneficio para cualquier empresa. Por otro lado, el lavador de gases con amoníaco tendría ventajas frente a otros métodos porque se obtendría un producto con potencial aplicación como fertilizante.

Estrategias de mitigación de emisiones de CO_2 en la producción de acero

La producción de acero en México está conformada casi en su totalidad por laminación, y en menor medida por productos vaciados y de forja. Entre 1995-2005, el origen de la laminación incrementó su producción en hornos eléctricos; en 1995 el 63% de los productos laminados provinieron de hornos eléctricos, y el 37% restante se generó en convertidores catalíticos; y en el 2005, estas contribuciones fueron del 72% y 28% respectivamente (CMM, 2007).

En cuanto a la intensidad energética en la producción de acero, México observó en el 2005 13,5 GJ/t acero, mientras que a nivel mundial este indicador se situó entre 11,4 y 12.0 GJ/t acero. Como se aprecia, existe un potencial para reducir el uso de energía por unidad de producción en México. Por otra parte, tomando en cuenta

que la mayoría del acero se produce en hornos de arco eléctrico (EAF, por sus siglas en inglés), las estrategias para reducir la intensidad energética, y por ende, las emisiones de CO₂, deben dirigirse principalmente hacia este proceso.

Las emisiones de CO₂ del EAF se generan principalmente durante los procesos de fundición y refinación, que eliminan el carbono en forma de CO y CO₂ de los materiales de carga y los electrodos. Cuando los gases de escape calientes salen del EAF, el aire de combustión se introduce a la red de conductos para convertir el CO en CO₂. Las emisiones de CO₂ también se generan a partir de la utilización de quemadores oxi-combustible; los cuales mejoran la capacidad efectiva del EAF mediante el incremento de la velocidad de la fundición, y la reducción del consumo de electricidad y de electrodos, lo que disminuye las emisiones de GEI relacionadas con la energía. Por otra parte, los productos semi-acabados pueden ser procesados mediante sub-procesos diferentes, tales como recocido, conformado en caliente, laminados en frío, galvanizado, recubrimiento o pintura; y muchos de estos pasos requieren calentamiento o recalentamiento en hornos que, generalmente, son alimentados con gas natural, agregando con ello más emisiones de CO₂ (EPA, 2012).

Un estudio desarrollado para evaluar el ciclo de vida del acero producido en Polonia, arrojó que el 30% de las emisiones de CO₂ generadas en la producción de acero en hornos eléctricos se liberan de forma directa por el uso de combustibles, y el 51% son emisiones indirectas por el uso de energía eléctrica (Burchart-Korol, 2013).

Por su parte, la EPA (2012) publicó que existe una tendencia general en todo el mundo en relación a un aumento de las inyecciones de oxígeno y carbono en la producción de acero en los EAF. La eficiencia de las inyecciones de oxígeno se ha incrementado de forma simultánea, en particular con el desarrollo de herramientas de múltiples funciones; de forma tal que, la energía de combustibles fósiles

(oxígeno, carbono, naturales gas) representa hasta el 40% de la energía total consumida en un EAF, y aún más en algunos casos.

Aunque la mayoría de la producción de acero en San Luis Potosí se lleva a cabo en EAF, cada empresa trabaja bajo condiciones particulares de inversión y según las especificaciones que demandan los productos elaborados en cada una de ellas; además, varias empresas del mismo giro se dedican a la fabricación de piezas de hierro gris. Tomando en cuenta estas particularidades, a continuación se proponen diversas prácticas y tecnologías para mejorar la eficiencia energética, y con ello evitar emisiones de CO₂ en la producción de acero.

Mejora del control de procesos

El control del proceso puede optimizar las operaciones y por lo tanto reducir significativamente el consumo de electricidad. Los controles modernos que utilizan una multitud de sensores pueden ayudar a lograr esto en mayor medida que los controles usuales. Los sistemas dinámicos de control y seguimiento de los EAF se desarrollan hacia la integración de la supervisión en tiempo real de las variables de proceso, tales como la temperatura del baño de acero, los niveles de carbono, la distancia para el desguace, y la inyección de grafito y oxígeno, entre otras (Worrel et al., 2010). Estos sistemas de control (redes neuronales) pueden generar reducciones adicionales en el consumo de energía frente a los sistemas de control clásicos. Para un EAF, el potencial medio de ahorro se estimó en un 8% o 34,5 kWh/ tonelada (0,14 GJ / tonelada); además, la productividad aumentó un 9 a 12%, y el consumo de electrodos se redujo en un 25% (EPA, 2012).

Mediante el monitoreo de la composición y la velocidad de flujo del gas de escape del horno, se puede mejorar el uso de energía química en el horno. Se ha demostrado que, si el oxígeno inyectado para la post-combustión se monitorea continuamente con datos en tiempo real de las concentraciones de CO y CO₂ en los gases residuales, se puede lograr un aumento del 50% en la tasa de recuperación

de energía química en los humos, ya que la eficiencia de la inyección de oxígeno y carbón puede evaluarse por la proporción CO/CO₂ (Januard et al., 2006).

Se han reportado casos en los que se instalaron sistemas de monitoreo continuo de CO, CO₂, H₂ y O₂ para el control post-combustión, y se observaron reducciones en el consumo eléctrico entre 2-4%, del gas natural entre 8-16%, y de inyección de carbón un 18% ((Worrel et al., 2010).

El aumento de potencia

Las pérdidas del transformador pueden llegar al 7% de las entradas eléctricas; estas mermas dependerán principalmente por el tamaño y la antigüedad del transformador. La conversión del funcionamiento del horno a una mayor potencia o más específicamente a ultra-alta potencia (UHP), aumenta la productividad y reduce las pérdidas de energía. El aumento de potencia se puede lograr por la instalación de nuevos transformadores o por el arreglo en paralelo de los ya existentes.

Controladores ajustables de velocidad

Como el flujo de gases de combustión varía con el tiempo, los controladores ajustables de velocidad (ASD, por sus siglas en inglés) ofrecen oportunidades para operar los ventiladores de recolección de polvo de una manera más eficiente. Los TEA del flujo de gases de combustión se han instalado en varios países, obteniendo un ahorro de electricidad que se estima en 15 kWh / tonelada (16,5 kWh / tonelada) (Stockmeyer et al., 1990). Aunque las tasas de recolección de polvo se redujeron solo entre 2-3%, el uso total de energía disminuyó en un 67% (Worrel et al., 2010).

Práctica de la escoria espumosa

Al cubrir el arco y la superficie del fundido con escoria espumosa, las pérdidas de calor por radiación a partir de la masa fundida pueden reducirse. Esta escoria se puede obtener mediante la inyección de carbono (carbón granular) y oxígeno, o por punción de oxígeno solamente. Esta práctica aumenta la eficiencia de la energía

eléctrica en al menos un 20%; el ahorro de energía neta (que representan el uso de energía para la producción de oxígeno) se estiman en 7,5 kWh/t acero (EPA, 2012).

Inyección de residuos

Recientemente, la investigación aplicada ha demostrado que los residuos plásticos pueden inyectarse como combustible en un EAF. Con el uso de residuos de plástico de polietileno, el proceso es capaz de reemplazar el 30% de coque y el carbón utilizado en la fabricación de acero en estos hornos. Este nuevo proceso ha demostrado la capacidad de acelerar el proceso de formación de espuma de escoria en la parte superior de la masa fundida, con el consiguiente ahorro de energía, obteniendo también una mayor productividad. Los beneficios adicionales incluyen la reducción de los residuos de plástico con una mayor eficiencia (térmica), y las emisiones de CO₂. El ahorro de energía de este proceso se estima en alrededor de 11 kWh / t de plástico (Worrel et al., 2010).

Hornos de Arco de Corriente Directa (DC)

En un horno DC se utiliza un solo electrodo, y la parte inferior del recipiente sirve como ánodo. Sobre la base de la característica distintiva de utilizar el calor y la fuerza magnética generada por la corriente en la fusión, este horno de arco logra un ahorro energético de aproximadamente el 5% en términos de consumo de unidad de potencia en comparación con el horno de arco de corriente alterna. Además, también tiene otras características, incluyendo una mayor eficiencia de fusión, con un consumo de energía de 454 a 544 kWh / tonelada (1,8 a 2,2 GJ / tonelada) de acero fundido. El consumo de electrodos es aproximadamente la mitad que con los hornos convencionales, esto corresponde a 2,4 hasta 4,9 lb / ton (1-2 kg /tonelada) de acero fundido (EPA, 2012).

Pre calentamiento de la chatarra (scrap)

La tecnología de precalentamiento de chatarra puede reducir el consumo de energía de los AEF a través del uso del calor residual del horno para precalentar la carga de chatarra. Los sistemas de precalentamiento anteriores tenían varios problemas por las emisiones, los altos costos de manejo, y una tasa relativamente baja de recuperación de calor. Los sistemas modernos han reducido estos problemas y son altamente eficiente (Worrell et al., 1999). Un ejemplo destacado de la aplicación de esta tecnología es el proceso Consteel, que consta de una cinta transportadora que precalienta y traslada la chatarra al EAF a través de un túnel, permitiendo una carga continua durante la fundición. Además del ahorro de energía, el proceso Consteel puede aumentar la productividad en un 33%, disminuir el consumo de electrodos en un 40%, y reducir las emisiones de partículas (EPA, 2012).

Sustitución de combustibles de alto carbono por combustibles bajos en carbono

Una opción para reducir las emisiones de dióxido de carbono es el reemplazo hacia combustibles de baja carbonización, por ejemplo, desplazamiento del gas LP por gas natural.

Prácticas en el proceso de Acabado

Recientemente se ha comercializado en los E.U.A un importante cambio en el vaciado continuo, llamado vaciado en plancha delgada. Este innovador proceso presenta un significativo potencial de reducción en el uso de energía y el tiempo de producción: además, permite que las mini-plantas compitan con las plantas integradas en las líneas de productos de láminas y cintas.

En acabados secundarios, el laminado caliente de cinta vaciada a rolados en frío, en una atmósfera inerte, podría eliminar una serie de pasos de remoción de costras, limpieza y cementado, logrando con esto un ahorro de 50 a 100 kWh/ton. Además, las nuevas tecnologías en acabados posibilitan el laminado directo de láminas y

cintas, lo que elimina la necesidad del horno de recalentamiento, recuperación de calor de desperdicio de hornos de recalentamiento y el laminado en frío (CMM, 2007).

Estrategias de mitigación de emisiones de CO₂ en la producción de azúcar

Durante la producción de azúcar se obtienen otros productos como la melaza, el alcohol y el bagazo de caña, pero no todos los ingenios los aprovechan; la mayoría ven en la industria del papel un mercado que les permite obtener mejores ganancias al venderles el bagazo, haciendo necesario complementar sus necesidades energéticas con otro tipo de combustibles (CMM, 2007).

Como biomasa, el bagazo de caña se promueve como combustible sustentable debido, en gran parte, al aprovechamiento de este residuo que resulta de la producción de azúcar, pero también por su baja contribución en emisiones contaminantes al aire, como los NO_x y el SO₂ (US-EPA, 1996; Janghathaikul y Gheewala, 2006). Sin embargo, por su reconocida capacidad fotosintética, la caña presenta valores de fijación de CO₂ elevados (Aguilar, 2011); de forma tal que, al momento de su combustión se generan emisiones importantes de este gas; por esto, la única vía posible para continuar con el uso del bagazo, y reducir las emisiones durante su combustión, sería mediante el uso de equipos de control de emisiones del gas o mejorar la eficiencia energética.

El factor de emisión de CO₂ atribuible al bagazo de caña, al considerarse como biomasa sólida, es de 705,50 kilogramos de CO₂ por tonelada de bagazo (IPCC, 2006). Por otra parte, a la mayoría de los ingenios azucareros en México no les resulta económico secar el bagazo de caña, por lo que tienen la práctica de quemarlo bajo condiciones de un 50% de humedad (SENER, 2011); lo que trae como consecuencia que su poder calorífico se reduzca y alcance 7 055 MJ por tonelada de bagazo (DOF, 2010). Bajo las condiciones anteriores, con un factor de emisión de CO₂ alto y un poder calorífico bajo, al obtener el índice de carbonización

del energético, que se obtiene por la razón de las emisiones entre unidad de energía, éste resulta en 0,0001106 tCO₂/MJ, esto es 0,62035 tCO₂/BEP; que deriva en el índice de carbonización más alto de todos los combustibles que integran la matriz energética del sector industrial manufacturero de San Luis Potosí.

Renouf et al. (2011) realizaron un análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) para comparar tres sistemas de procesamiento de la caña de azúcar, cuyas diferencias estribaron en la cantidad de productos generados a partir de la caña en cada sistema. Los autores concluyeron que el LCA para los productos de caña de azúcar australianos están influenciados por la naturaleza del sistema de procesamiento de la caña (el rango de productos producidos a partir de la caña); y que los sistemas en los que se incluyó la co-generación de electricidad fueron los de menos impactos ambientales debido a que se evitaron las emisiones de CO₂ indirectas por el uso de electricidad pública en la que, generalmente, se quema carbón en las termoeléctricas.

Ahora bien, si se considera continuar con el uso de bagazo de caña en la producción de azúcar, y se descarta la posibilidad del uso de equipos de control de emisiones de CO₂, queda la alternativa de mejorar la eficiencia energética para lograr un mayor aprovechamiento por unidad de energía utilizada.

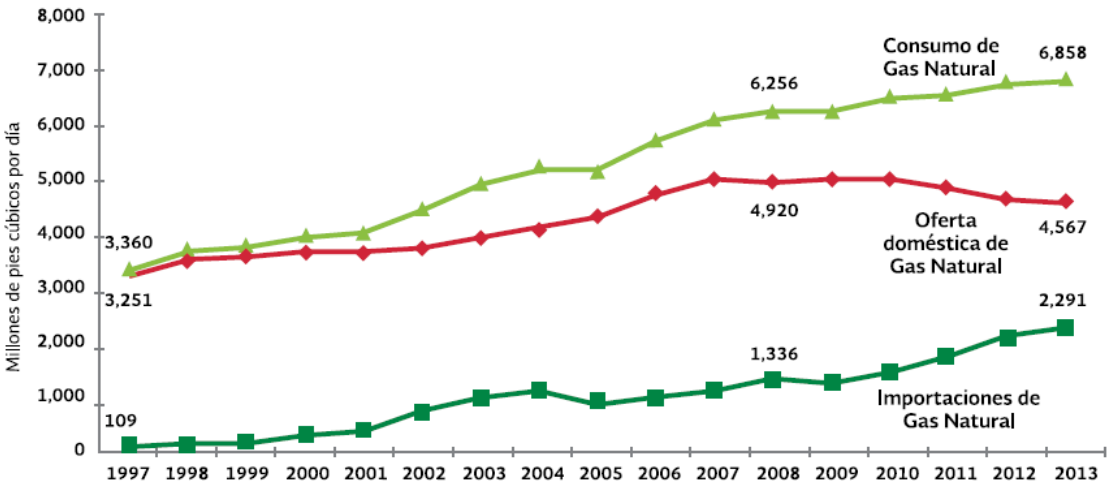
Dinámica de la demanda del gas natural

Aunque el gas natural es un combustible fósil, su uso se promueve debido a que, al ser quemado, emite menos contaminantes y GEI al aire que el resto de los combustibles de su categoría. Por ejemplo, mientras el combustóleo por cada metro cúbico emite 6 600 gr de NO_x, 143 gr de CO, y 3 113 kg de CO₂; el gas natural solo 3,76 gr, 0,088 gr, y 2,22 kg, respectivamente (US-EPA 2012; SMA-DF, 2006).

La disminución del precio del gas natural en los últimos años favoreció su preferencia en el sector industrial de México, respecto a otros combustibles. En

2012, el consumo de este energético representó 64,8% del total de combustibles industriales, mientras que el gas L.P. un 5,9%, el diésel un 10,0%, en tanto que el coque de petróleo mantuvo una participación similar a la de 2011. El uso del combustóleo continuó disminuyendo, al continuar su sustitución por coque de petróleo, residuos combustibles y bagazo de caña (SENER, 2013).

Entre 2008 y 2012, la producción de gas natural en México disminuyó 7%, mientras que el consumo nacional aumentó 9% (Gráfica 6.3). Esta diferencia se cubrió a través de importaciones, por lo que se registró un incremento considerable de las mismas. Entre 1997 y 2012, la proporción de gas importado para el consumo interno pasó de 3% a 33% del total nacional. Alrededor de 98,3% de las exportaciones de Estados Unidos en 2012, se realizaron a través de gasoductos, de las cuales 39% se realizaron hacia México y el restante 61% fueron a Canadá.

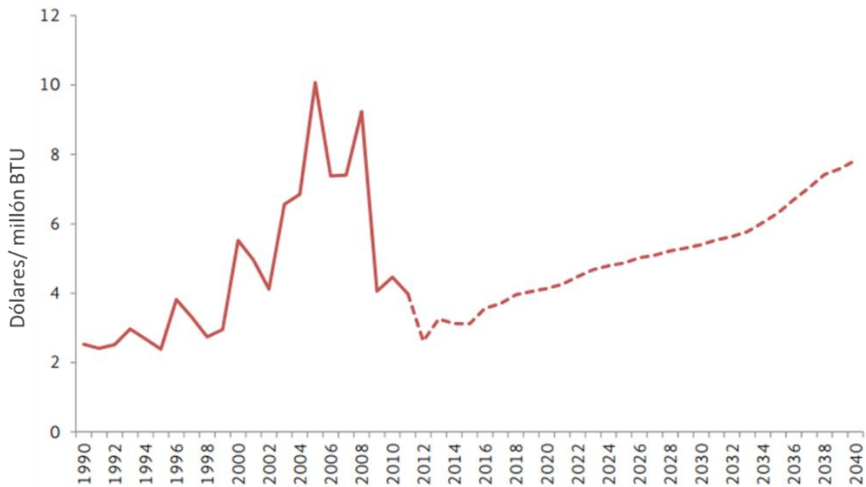


Gráfica 6.3. Demanda y capacidad de transporte de gas natural (SENER, 2012).

Los precios del gas natural se han determinado a escalas regionales, por lo que no existe un precio representativo a nivel mundial, como es el caso del petróleo. El precio corriente del gas Henry Hub de la costa del golfo de Estados Unidos alcanzó un mínimo histórico en 2012 de 2,76 dólares estadounidenses por millón de BTU

(US\$ por millón de BTU), debido a la abundancia de la oferta; sin embargo, los expertos opinan que el precio debe volver a un nivel más equilibrado en el corto plazo, aproximadamente 4,00 US\$ por millón de BTU, que es un precio más acorde con los costos de producción de gas de lutitas. De hecho, la Agencia Internacional de Energía (EIA, por sus siglas en inglés), espera un aumento del 2,4% anual, hasta llegar a 7,83 US\$ por millón de BTU en el año 2040, explicado por un crecimiento en el costo del desarrollo de nuevos volúmenes de producción, así como en el desarrollo de las exportaciones del hidrocarburo (Gráfica 6.4).

De acuerdo al panorama antes descrito, se podría vislumbrar un aumento en el uso del gas natural, fundamentado en el volumen y los precios de oferta. Sin embargo, el incremento en el uso industrial de este energético en México puede ser a tasas más bajas mientras el abastecimiento dependa, en gran parte, de las importaciones de Estados Unidos, debido a que el precio de venta se fija de acuerdo a la dinámica de las exportaciones de aquél país; que como se analizó anteriormente, se espera un incremento en el mismo en los próximos años. Por otra parte, a partir del 2018, la tasa de consumo del energético podría experimentar un incremento significativo, sustentado en las metas de la reforma energética de México, que establecen un aumento del 40,35% en la producción del hidrocarburo entre 2013 y 2018; a la vez que se espera una disminución en el precio del mismo.

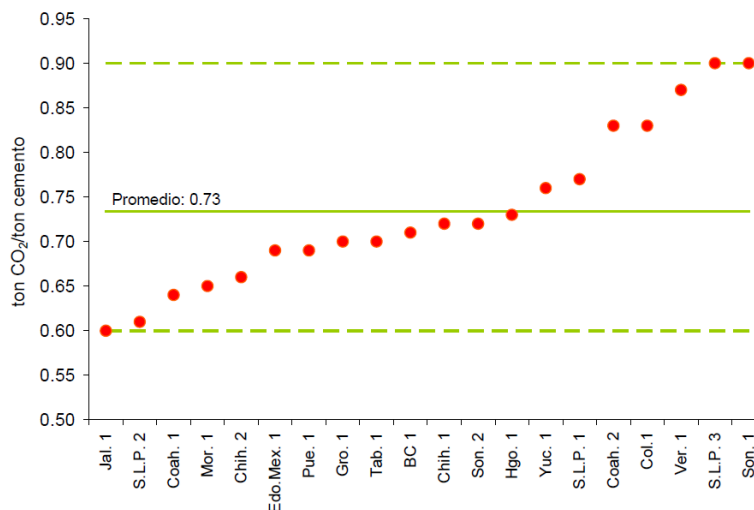


Gráfica 6.4. Promedio anual de los precios del gas natural Henry Hub (EIA, 2013).

6.4 Resultados

Opciones de mitigación de emisiones de CO₂ para el subsector de fabricación de cemento de San Luis Potosí

De acuerdo al periodo analizado en el presente estudio, el promedio anual de intensidad de carbonización de la energía en la producción de cemento en San Luis Potosí, entre 2000-2012, fue 0,5367 tCO₂/BEP y el consumo energético anual por el uso de combustibles fue de 1 520 248 BEP. Una de las tres plantas productoras de cemento instaladas en el estado cuenta con los equipos más modernos a nivel mundial: el analizador en línea de materias primas Gamma - Metrics, y la tecnología única de los molinos Horomill para harina cruda y cemento; lo que se traduce en un ahorro de energía, realizando con ello una contribución al cuidado del medio ambiente, lo cual se refleja en su intensidad de carbonización del clinker (Gráfica 6.5). Sin embargo, aún existen oportunidades de mejora que pueden aprovecharse para obtener ahorros importantes de energía y de emisiones de CO₂, en el corto y mediano plazo.



Gráfica 6.5. Intensidad de carbono del clinker en plantas cementeras de México en el 2005 (CMM, 2007).

Dentro de las estrategias que proponemos para este fin, se encuentran:

1. Reemplazo de combustibles de alto índice de carbonización por combustibles menos intensivos en carbono. Considerando que los combustibles utilizados en la producción de cemento en San Luis Potosí son el coque de petróleo y el combustóleo, que dentro de la matriz de combustibles del sector manufacturero son los de más altos índices de carbonización; de manera tal que, cualquier reemplazo por otros de menor contenido de carbono como el gas natural o combustibles alternativos como el biogás, impactarán de forma positiva en la mitigación de emisiones de CO₂.

La utilización de residuos municipales con alto poder calorífico, provenientes de la Fracción Inorgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FIRSU), puede ser un opción viable como combustible alternativo. Varios estudios han demostrado un mejor efecto ambiental por sus características específicas de eficiencia bajo temperaturas altas (Strazza, et. al, 2011). Güereca y Juárez (2012) llevaron a cabo un análisis de ciclo de vida de los residuos sólidos urbanos, en el que se propone el uso estratégico de FIRSU como combustible alternativo para la industria cementera, con lo que se lograría una reducción del 20% en el uso de coque.

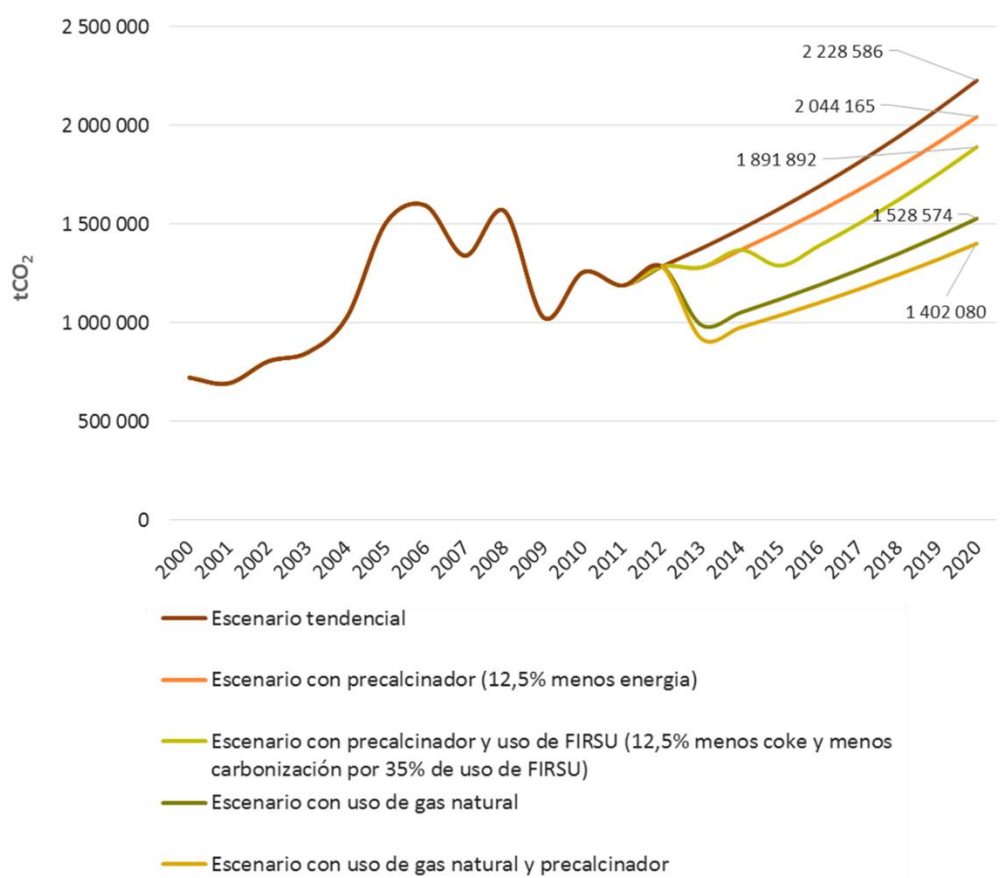
2. Conversión de proceso seco a horno con precalentamiento en multi-etapas y precalcinator. Se pueden obtener mejoras energéticas por medio del reemplazo de equipos más eficientes en el uso de energía, los cuales pueden dar hasta 2.9 GJ/t clinker (700 Kcal/kg) (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Eficiencia Energética en hornos de clinker en la industria del cemento (CMM, 2007).

Proceso	Kcal/kg clinker
Proceso seco	~ 1100
Precalentador de 1-etapa	~ 1000
Precalentador de 2-etapas	~ 900
Precalentador de 4-etapas	~ 800
Precalentador y precalcinador de 4-etapas	~ 735-750
Precalentador y precalcinador de 5-etapas	~ 710-730
Precalentador y precalcinador de 6-etapas	~ 700

3 Incluir materias primas cementosas alternativas para reducir el factor clinker. Para sustituir una porción del clinker, pueden utilizarse productos industriales como las cenizas de carbón (residuo de la quema de coque), escorias (residuos producción del hierro) o material volcánico. Dada la ubicación estratégica de la ciudad de San Luis Potosí, existen grandes posibilidades de adquirir cualquiera de estos materiales sustitutos, sin que se incurra en una inversión significativa; y sin embargo, se podrían lograr reducciones hasta del 5% en las emisiones de CO₂ (Ali et al., 2011).

Para conocer el potencial de mitigación bajo distintas alternativas de mitigación, se realizó una simulación con la identidad de Kaya, previamente analizada en el capítulo anterior, en la cual se introdujeron los cambios de acuerdo al impacto de cada estrategia (Gráfica 6.6).



Gráfica 6.6. Escenarios de mitigación para el subsector de fabricación de productos a base de minerales no metálicos, bajo distintas estrategias.

Opciones de mitigación de emisiones de CO₂ para el subsector de hierro y acero en San Luis Potosí

La industria del acero en San Luis Potosí opera, en su mayor parte, con hornos de arco eléctrico (EAF), y la matriz de combustibles del sector se compone de gas natural, gas LP, combustóleo, diésel; y el carbón que se inyecta a los EAF. Aunque las grandes empresas dedicadas a la fabricación de varillas y perfiles de acero utilizan el gas natural en sus procesos, aún existen otras dedicadas a la fundición de piezas especiales de hierro gris, que usan el gas LP en grandes cantidades. Por lo anterior, las estrategias de mitigación que se sugieren para aprovechar el potencial de mitigación en este subsector, se perfilan de la siguiente manera:

1. **Reemplazo de combustibles de alto índice de carbonización por combustibles menos intensivos en carbono.** Considerando que cerca del 70% de la energía primaria utilizada en el subsector de la industria metálica básica proviene del gas LP, se sugiere el reemplazo de este combustible por otro energético menos intensivo en carbono.
2. **Implementación de mejores prácticas o tecnologías en Hornos de Arco Eléctrico.** Para aquellas empresas que ya utilizan el gas natural en el proceso de EAF, las opciones antes descritas significan un potencial de mitigación tanto para emisiones de CO₂ directas como indirectas por el consumo de energía eléctrica. Estas acciones pueden ser:
 - * Mejoras del control de procesos
 - * El aumento de potencia
 - * Controladores ajustables de velocidad
 - * Práctica de la escoria espumosa
 - * Inyección de residuos
 - * Hornos de Arco de Corriente Directa (DC)
 - * Precalentamiento de la chatarra (scrap)
 - * Prácticas en el proceso de Acabado

Opciones de mitigación de emisiones de CO₂ para el subsector de producción de azúcar en San Luis Potosí

En la presente investigación, la industria alimentaria resultó ser uno de los subsectores con mayor intensidad energética dentro del sector manufacturero de San Luis Potosí. Su fuente principal de energía es por el uso de bagazo de caña en la producción de azúcar. El consumo anual estatal promedio de este biocombustible fue de 1 220 761 toneladas (2000-2011) (ANC, 2011). Dada la naturaleza de este tipo de combustible renovable, y considerando que los ingenios azucareros de San Luis Potosí producen, en gran parte, su propia energía eléctrica, las estrategias de mitigación de CO₂ para esta rama industrial son las siguientes:

1. Cogeneración de energía. Las emisiones de CO₂ generadas por la quema de bagazo de caña se consideran como emisiones neutras debido a que forman parte de un cultivo cíclico en el que se absorbe CO₂ durante el crecimiento de la caña y se libera durante la combustión del bagazo (Mtunzi et al, 2012). Aun así, estas emisiones pueden ser compensadas por sistemas de cogeneración de electricidad, evitando de esta forma el consumo de energía eléctrica de la red nacional, misma que se produce, en su mayoría, con combustibles fósiles.

Los ingenios azucareros de San Luis Potosí producen casi la totalidad de su requerimiento de energía eléctrica (Tabla 6.3), para lo cual aprovechan en gran parte el bagazo de caña; sin embargo, en promedio los cuatro ingenios producen 19,71 kw-hr/ tonelada de caña (periodo 2004-2012), lo cual es deficiente en comparación con los 90 a 140 kw-h/ tonelada de caña producidos en los ingenios de Brasil e India (Evans-Pughe, 2007); en Nicaragua producen en promedio 53,84 kw-h/ tonelada de caña (Blanco-Orozco y Arce-Diaz, 2013). Como se observa, los ingenios de San Luis Potosí tienen un potencial de mejoramiento de su eficiencia energética, y que puede derivar en la cogeneración de energía eléctrica.

Tabla 6.3. Consumo y generación de electricidad en los ingenios azucareros de San Luis Potosí durante la zafra 2003/04. Elaboración propia con datos de CMM (2007).

Ingenio	Autogeneración de electricidad	Consumo total de electricidad (kW)	Consumo kW/t caña	Electricidad comprada a CFE (%)
Plan de San Luís	21 122 400	22 370 360	27,05	5,58
Plan de Ayala	16 301 405	18 348 480	22,46	11,16
San Miguel del Naranjo	14 837 475	15 304 766	16,16	3,05

Alianza Popular	14 310 363	15 394 308	15,40	7,04
-----------------	------------	------------	-------	------

2. Agregar valor a los subproductos generados en la producción de azúcar.

Los residuos de las industrias pueden aprovecharse dentro de las mismas, lo cual puede ser una de las soluciones para la verdadera sostenibilidad de un proceso; esto es, cuando cada una de los materiales o sustancias involucradas es aprovechada al máximo, adquiriendo con ello un valor agregado y dejando en cambio pocos residuos. Por ejemplo, el bagazo de caña se puede utilizar como combustible para producir electricidad, la melaza para producir bioetanol, y del proceso de destilación de esta última se puede aprovechar el dunder, que es un residuo rico en potasio, y que se puede aplicar para acondicionar la tierra para el mismo cultivo de caña.

3. Mejoras en la eficiencia energética.

La aplicación de las mejores prácticas de un sistema de mantenimiento adecuado permitiría incrementos de la eficiencia energética, sobre todo en equipos antiguos como los utilizados en los ingenios azucareros en estudio.

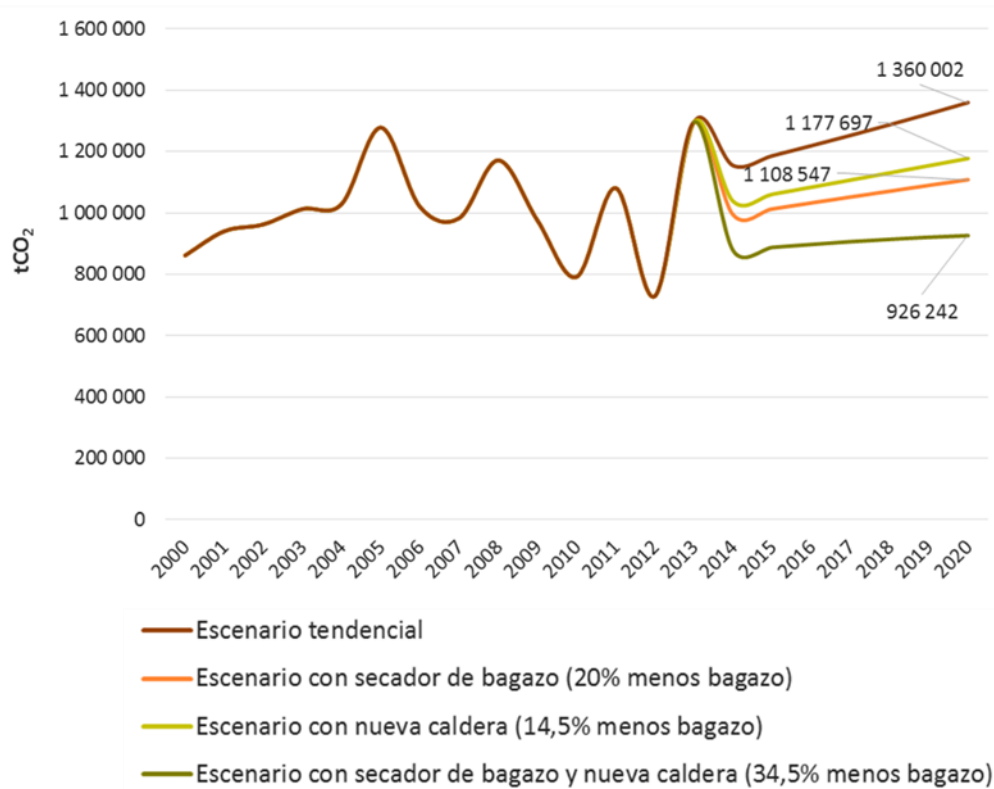
Existen diversos casos que muestran incrementos en la eficiencia energética de los ingenios. D'Angelo et al. (2006) realizaron un estudio en el que consideraron las características operativas de las calderas usadas en los ingenios azucareros de México, y evaluaron las posibilidades técnicas para el pre secado de bagazo como alternativa de reducción del consumo de combustible. Los resultados demostraron la viabilidad técnico-económica de la incorporación de un secadero de bagazo en las calderas, lo que permitió mejorar la combustión al reducir la humedad del bagazo de un 51,15% al 41,75%. En términos de eficiencia energética, se consiguió un ahorro del 20% en la cantidad de bagazo utilizado, al pasar de 28 963 kg/h a 23 168 kg/h. Cabe destacar que los requerimientos

energéticos para el funcionamiento del secador se cubren con el 42% de los gases emitidos por la caldera, con lo cual se evita un consumo extra de energía.

4. Modernización de maquinaria y equipo. Existen diferencias entre el desempeño energético de los cuatro ingenios ubicados en San Luis Potosí, debido a que la mayoría de las instalaciones son muy antiguas y operan con tecnologías, equipos y prácticas obsoletas. Si se pudieran replicar los sistemas y métodos utilizados en los ingenios más eficientes, sería posible lograr ahorros cuantiosos en el consumo de combustible y de electricidad.

Rodríguez (2004) mostró un caso de estudio de un ingenio azucarero en el que se logró un incremento en la eficiencia energética con la instalación de una nueva caldera, al pasar de 1,66 lb de vapor/ lb de bagazo a 1,90 lb de vapor/ lb de bagazo, con lo que se redujo el consumo del energético en un 14,5%. Con esto, la generación de vapor cambió de 440 a 510 klb de vapor/hr, que se aprovechó al realizar mejoras en los sistemas de generación de electricidad; para lo cual se instaló un turbogenerador de contrapresión–extracción y otro de condensación, logrando con esto tanto la producción necesaria electricidad de 7MW para el funcionamiento del mismo ingenio, y un excedente de 11,5 MW de los cuales se asignaron 8,5 para abastecer a las empresas filiales del ingenio y 3 MW para vender al sistema nacional.

Al considerar algunas de estas estrategias, se realizó una simulación, considerando los tres factores determinantes que se explicaron en el capítulo, por medio de la ecuación de Kaya, y se proyectaron los escenarios al 2020 para mostrar el potencial de mitigación que se lograría con respecto al escenario tendencial (Gráfica 6.7).



Gráfica 6.7. Potencial de mitigación de emisiones del subsector de la industria alimentaria, bajo distintas estrategias de mitigación.

6.5 Conclusiones

De acuerdo a la búsqueda y el análisis que se llevó a cabo, existe una amplia gama de alternativas de reducción de emisiones para el sector industrial. En términos generales, el enfoque bajo el cual se proponen es sectorial, dado que, en definitiva, es la perspectiva más concreta y factible para obtener y medir los beneficios de reducción propuestos.

De acuerdo al escenario tendencial de la industria cementera, proyectado al 2020, las emisiones podrían alcanzar 2 228 586 tCO₂; sin embargo, debe tomarse en cuenta que estos escenarios fueron contruidos bajo los valores medios del PIB, la intensidad energética y el índice de carbonización; los cuales se ven influenciados por los periodos en los que la industria cementera de San Luis Potosí mostró fuertes

incrementos durante el 2004 y 2005, debido a la instalación de una nueva industria de este giro.

Por otra parte, la industria cementera del estado utiliza los procesos secos de producción, que son más eficientes que los húmedos, y son procesos que además cuentan con precalentadores, lo cual incrementa aún más la eficiencia; sin embargo, como se mostró en la proyección, todavía pueden aplicarse alternativas para mejorar la eficiencia energética en el uso de combustibles. De las alternativas planteadas, el reemplazo del uso de coque por el gas natural es, sin duda, la mejor opción en términos de reducción de CO₂; sin embargo, de acuerdo al análisis realizado sobre las tendencias del uso de gas natural, esta opción no será factible en un corto plazo.

El uso parcial de la FIRSU como combustible alternativo para los hornos de cemento, y la instalación de un precalcinador son una alternativa que promete una reducción de emisiones significativa del 15,10% respecto al escenario tendencial. Por otra parte, es necesario llevar a cabo un análisis de costo-beneficio para costear las implicaciones de llevar a cabo la separación y el transporte de la FIRSU de los residuos sólidos urbanos, así como la inversión inicial para la adquisición e instalación de los precalcinadores.

En relación a la industria azucarera, se presenta un potencial considerable de reducción, a pesar de que el uso de bagazo de caña es *per se* una acción de mitigación de emisiones de CO₂. Si se considera solo la instalación de un secador de bagazo, se consigue una reducción de emisiones del 18,48% con respecto al escenario tendencial, y la inversión no es significativa, de acuerdo a D'Angelo et al. (2006). Por otro lado, aunque la inversión por la adquisición de una nueva caldera es elevada, la reducción de emisiones es menor que la del secador; sin embargo, con una caldera que brinda una mejor eficiencia energética, se puede aprovechar

el potencial en la eficiencia de la producción de vapor para iniciativas de cogeneración de energía eléctrica.

6.6 Referencias

Aguilar Rivera, N. (2011). *Competitividad de la agroindustria azucarera de la huasteca México*. (Tesis inédita de doctorado). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

Ali, M. B., Saidur, R. y Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2252–2261.

ANC. (2011). Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2002-2011. Asociación Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. México.

Blanco-Orozco, N.V. y Arce-Díaz, E. (2013). El uso eficiente de la energía eléctrica en los ingenios azucareros como contribución al desarrollo sostenible de Nicaragua. *Tecnología en Marcha*, 26(3), 84-93.

Choate, W. T. (2003). *Energy and Emission Reduction Opportunities for the Cement Industry*. BCS Incorporated. Columbia, MD, USA.

CMM (2007). *Formulación de lineamientos de política en materia de eficiencia energética en sectores clave de la economía mexicana para el programa especial de cambio climático*. Centro Mario Molina. México.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2010). Lista de combustibles que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como sus factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo. Secretaría de Energía. México. 25 pp.

EPA (2012). *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Iron and Steel Industry*. U.S. Environmental Protection Agency. USA.

Evans-Pughe, C. (2007). Sugar Rush. *Engineering & Technology*, 2(2), 38-42. Recuperado el 18 de agosto de 2014, de <http://web.ebscohost.com>

Güereca Hernández, P. y Juárez López, C. (2012). *Los impactos ambientales de la disposición de los residuos municipales: Co-procesamiento y Relleno Sanitario*. Ponencia presentada en el 9° Foro Internacional “Desde lo Local”, efectuado en San Luis Potosí, México.

Hendriks, C. A., Worrell, E., de Jager, D., Blok K. y Riemer, P. (2004). *Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry*. IEA Greenhouse gas R&D Programme, USA.

He, Q., Chen, M., Meng, L., Liu, K. y Pan, W-P. (s.f.). Study on carbon dioxide removal from flue gas by absorption of aqueous Ammonia. Recuperado el 20 de septiembre de 2014 de <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/04/carbon-seq/158.pdf>

Hoyos, A. E., Jiménez, M. M., Ortiz, A. y Montes de Correa, C. (2008). Tecnologías para la reducción de emisiones de gases contaminantes en plantas cementeras. *Ingeniería e Investigación*, 28(3), 41-46.

IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón.

Janghathaikul, D. y Gheewala, S.H. (2006). Bagasse - A sustainable energy resource from sugar mills. *Asian Journal on Energy and Environment*, 7(03), 356-366.

Januard, F., Bockel-Macal, S., Vuillermoz, J.C., Leurent, J. y Lebrun, C. (2006). Dynamic control of fossil fuel injections in EAF through continuous fumes monitoring. Recuperado el 10 de septiembre de 2014, de: http://www.americancombustion.com/file/otherelement/pj/3%20eec_2005_fumes48749.pdf

McCaffrey, R. (2001). Climate change and the cement industry. GCL: Global Cement and Lime Magazine.

Mtunzi, B., Mampwheli, N., Meyer, E. y Mungwena, W. (2012). Bagasse-based co-generation at Hippo Valley Estates sugar factory in Zimbabwe. *Journal of Energy in Southern Africa*, 23(1), 15-22.

Niu, Z., Guo, Y., Zeng, Q. y Lin, W. (2012). Experimental studies and rate based process simulations of CO₂ absorption with aqueous Ammonia solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 5309–5319.

Renouf, M. A., Pagan, R. J. y Wegener, M. K. (2010). Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing. *Int J Life Cycle Assess* 16: 125-137.

Rodríguez Cheing, R. (2004). Incremento de beneficios en un ingenio azucarero mediante el mejoramiento del uso del bagazo de caña de azúcar. Recuperado el 18 de septiembre de 2014 de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14667>

SENER-AIE (2011). Indicadores de eficiencia energética: 5 sectores 5 retos. Secretaría de Energía en colaboración con la Agencia Internacional de Energía. México.

SENER (2013). Prospectiva del gas natural y gas L.P. 2013-2027. Secretaría de Energía. México.

Strazza, C., Del Borghi A., Gallo M., Del Borghi M., 2011. Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production: analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach. *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 1615-1621

Taylor, M., Tam, C. y Gielen, D. (2006). Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry. Paper prepared for the IEA-WBCSD workshop: Energy efficiency and CO₂ emission reduction potentials and policies in the cement industry, IEA, Paris, 4-5 September 2006.

US-EPA (1996). Bagasse Combustion In Sugar Mills. Environmental Protection Agency. Recuperado el 20 de Julio de 2012 de <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s08.pdf>

Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., Ramshaw, C. y Yeung, H. (2011). Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1609-1624.

Yeh, A. C., Bai, H. (1999). Comparison of Ammonia and Monoethanolamine solvents to reduce CO₂ greenhouse gas emissions. *Science of the Total Environment*, 228, 121-133.

Yeh, J. T. y Pennline, H. W. (2004). Absorption and regeneration studies for CO₂ capture by aqueous Ammonia. *Third Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration* May 3-6, 2004 Alexandria, VA.

Conclusiones generales

Durante el periodo 2000-2006, las emisiones totales de CO₂e de los procesos industriales, generadas tanto por la transformación de las materias primas utilizadas en los diferentes procesos del sector industrial, así como por el uso de combustibles como fuentes de energía, resultaron en 39 985 755 toneladas. De estas emisiones, 12 875 382 que corresponde con el 30%, fueron liberadas, principalmente, por el uso de carbonatos como materias primas en los procesos, mientras que las restantes 27 110 373 toneladas, fueron producto de la quema de los diferentes combustibles utilizados en los procesos de este sector.

Las subcategorías de mayor contribución, en términos absolutos de emisiones, fueron: cemento con un 39%, hierro y acero con un 26%, alimentos y bebidas con el 19%, cal con el 6%, y las subcategorías de uso de piedra caliza, vidrio y papel participaron cada una con un 3%.

Del cálculo de la incertidumbre que se llevó a cabo en el inventario, en forma específica para cada subcategoría, se observa que el método utilizado de Factores de Emisión para la estimación del inventario, proporciona una certidumbre adecuada, siempre y cuando se hayan aplicado previamente las acciones de control de calidad de los datos de actividad. Por otra parte, la aplicación del enfoque bottom-up para el cálculo de las emisiones, aunado a las acciones de control de calidad, contribuyó en gran medida para asegurar la calidad del inventario. Esta aportación se reflejó y constató en la comparación que se efectuó entre las emisiones calculadas bajo el enfoque top.down y el de bottom-up.

Con base en la experiencia en la elaboración del inventario, podemos observar que las dependencias de gobierno, en sus distintos niveles, se reservan con cautela la información correspondiente con datos puntuales de las empresas comprendidas en la entidad de interés; sobre todo si se trata con datos relativos al consumo de combustibles, ya que esta información se relaciona directamente con las emisiones

a la atmósfera. Por otra parte, como se abordó en el capítulo tres, aún y contando con información de bases de datos gubernamentales o habiendo tenido acceso directo a los formatos que las empresas entregan a las dependencias reguladoras ambientales de gobierno, esta información muestra datos incompletos e incongruentes, de forma tal que es imprescindible aplicar actividades de calidad para asegurar datos precisos.

En relación al análisis que se realizó para conocer los factores determinantes, según la ecuación de Kaya, que afectan en la variabilidad anual de las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustibles, se identificó que los factores de la intensidad energética y el PIB manufacturero contribuyen de forma importante sobre dicha variación; además, la intensidad de carbonización de la energía contribuyó en menor grado que los factores anteriores, pero de forma importante en algunos años del periodo evaluado.

La descomposición que se logró con la aplicación del LMDI en la identidad de Kaya, permitió observar que la dinámica de la variación de las emisiones no sigue una tendencia; en su lugar, se presentan cambios continuos que obedecen principalmente a la dinámica de los subsectores más intensivos en el uso de energía y cuyos combustibles son de alta carbonización, independientemente de su contribución al PIB; en este caso, fueron los subsectores de productos minerales no metálicos, la industria alimentaria y la metálica básica. Por ejemplo, con la descomposición de los factores que se obtuvo con el método LMDI, se identificaron episodios como el 2005-2006, 2006-2007 y 2011-2012 en los que el PIB manifestó un incremento pero las emisiones se redujeron por el efecto de la intensidad energética.

Por otra parte, se construyeron escenarios de emisiones de CO₂ proyectados al 2020, bajo distintos supuestos de variación de los factores determinantes de la intensidad energética, el índice de carbonización y el PIB manufacturero. Estas

proyecciones fueron un primer intento para tener una idea sobre el futuro posible de las emisiones del sector en manufacturero de San Luis Potosí. Entre estos se detectaron algunos escenarios alternativos que muestran potenciales de mitigación con respecto al escenario tendencial al 2020. Las principales alternativas se perfilan hacia la disminución de la intensidad energética y de carbonización de los subsectores más intensivos en energía, debido a que estos son tanto los más contribuyentes en emisiones absolutas, como los de mayor efecto en los factores determinantes analizados.

Finalmente, las estrategias de mitigación de emisiones de CO₂ que sugerimos para cada uno de los subsectores antes mencionados se dirigen, en su mayoría, hacia el mejoramiento de la eficiencia energética; sin embargo, se tomaron en cuenta, en la mayoría de los casos, las características locales de la industria de los distintos subsectores manufactureros; de forma tal que las estrategias se distinguieron y se perfilaron, según sus condiciones de desarrollo específicas.

De las alternativas planteadas en la industria del cemento, el reemplazo del uso de coque por el gas natural es, sin duda, la mejor opción en términos de reducción de CO₂; sin embargo, de acuerdo al análisis realizado sobre las tendencias del uso de gas natural, esta opción no será factible en un corto plazo. Por otra parte, el uso parcial de la FIRSU como combustible alternativo para los hornos de cemento, y la instalación de un precalcinador son una alternativa que promete una reducción de emisiones significativa del 15,10% respecto al escenario tendencial.

En relación a la industria azucarera, se presenta un potencial considerable de reducción, a pesar de que el uso de bagazo de caña es *per se* una acción de mitigación de emisiones de CO₂. Si se considera solo la instalación de un secador de bagazo, se consigue una reducción de emisiones del 18,48% con respecto al escenario tendencial, y la inversión no es significativa, de acuerdo a D'Angelo et al. (2006). Por otro lado, aunque la inversión por la adquisición de una nueva caldera

es elevada, la reducción de emisiones es menor que la del secador; sin embargo, con una caldera que brinda una mejor eficiencia energética, se puede aprovechar el potencial en la eficiencia de la producción de vapor para iniciativas de cogeneración de energía eléctrica.

Recomendaciones generales

El inventario de emisiones de CO₂ es una parte fundamental, pues es la base sobre la que se sustentan los futuros planes de acción de mitigación; de forma tal que, debe elaborarse con la mayor precisión posible. Sin embargo, con frecuencia, la única fuente de datos proviene de bases de instancias gubernamentales, por lo que es indispensable una revisión exhaustiva para verificar dichas bases. En el capítulo tres, se recomienda una serie de diez pasos para revisar/verificar los datos de actividad de las empresas, contenida en bases de instituciones gubernamentales.

De forma general, el sector industrial es de los más contribuyente en emisiones al aire, debido a que genera tanto emisiones directas por el uso de combustibles o indirectas por los requerimientos de energía eléctrica; así como aquéllas derivadas del uso no energético de combustibles fósiles como en los procesos de fabricación de acero, y por fuentes no combustibles durante la transformación de materias primas como el caso de la producción de cemento y cal. Por esto, con el propósito de llevar a cabo, y en el menor tiempo posible, las estrategias pertinentes de mitigación de emisiones, el gobierno debe implementar los mecanismos de gestión adecuados para que las empresas internalicen sus costos ambientales.

Para llevar a cabo un análisis estadístico más riguroso sobre las futuras emisiones de CO₂, se requiere una cantidad suficiente de datos, para proveer de mayor certeza a las conclusiones derivadas de dichos análisis. Por esto, se sugiere que se elabore una base de datos de emisiones que se mantenga actualizada de forma continua y con precisión, para efectuar estudios o análisis provistos de mayor precisión.

La información que brinda el método LMDI al proporcionar el efecto de cada factor determinante en la variación de las emisiones, y de manera desagregada la contribución de cada subsector en términos de su aportación en las emisiones de CO₂, es una herramienta de gran valor que sugerimos que se aplique también para

detectar y determinar la efectividad de estrategias de mitigación de emisiones, pues mediante esta metodología se pueden conocer las emisiones evitadas, según sea la efectividad de la implementación de determinada acción de reducción.

Los escenarios de emisiones de CO₂ proyectados al 2020, que se construyeron bajo el modelo de Kaya, son un primer intento por identificar los factores que determinan la dinámica de las emisiones de CO₂ en el sector manufacturero; sin embargo, los modelos como tal, están acotados al uso de un número finito de variables que pueden ser analizadas, por lo que constituyen representaciones parciales de la realidad. Por esto, se debe continuar en la búsqueda de variables o factores para llevar a cabo predicciones sobre escenarios cada vez más plausibles con la realidad.

Las estrategias propuestas, sobre todo las correspondientes con la adquisición de nuevo equipo para mejorar la eficiencia energética, se sustentan en las sugerencias llevadas a cabo en estudios de caso particulares. Por esto, se recomienda que, dadas las condiciones específicas de las empresas estatales a las que van dirigidas las estrategias, se realice el análisis de factibilidad correspondiente.

Por una parte, en relación al subsector de producción de cemento, es necesario llevar a cabo un análisis de costo-beneficio para costear las implicaciones de llevar a cabo la separación y el transporte de la FIRSU de los residuos sólidos urbanos, así como la inversión inicial para la adquisición e instalación de los precalcinadores. Por otra parte, para la industria azucarera, aunque la inversión para la adquisición de una nueva caldera es elevada, la reducción de emisiones es menor que la del secador. Ahora bien, para considerar la adquisición de una caldera de mayor eficiencia energética, se debe evaluar el potencial en la eficiencia de la producción de vapor para aprovechar la factibilidad de cogeneración de energía eléctrica, para lo cual deben proyectarse también los costos implícitos para tal iniciativa.

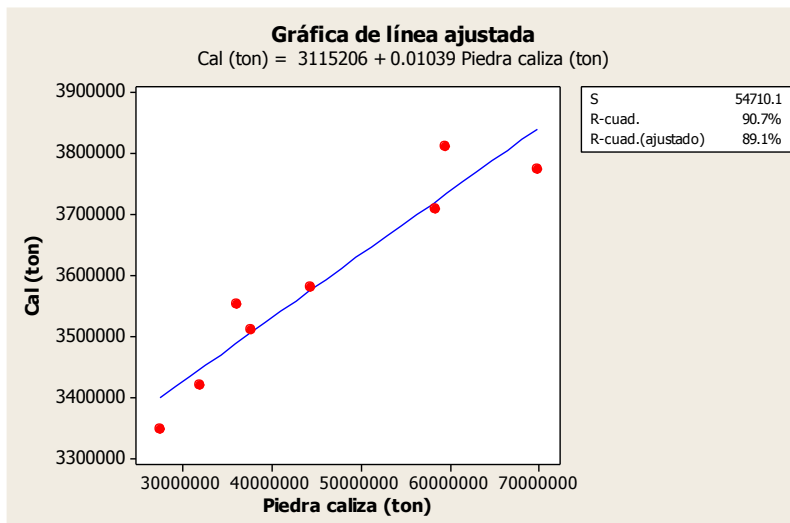
Si bien es cierto que el fenómeno del cambio climático afecta de forma global, las acciones para hacerle frente deben reducirse a escalas regionales o locales para

que los esfuerzos de abatimiento sean efectivos. El compromiso adquirido por México en el establecimiento de metas de mitigación de emisiones de CO₂ debe permear en todos los niveles de gobierno y en todos los sectores; de forma tal que las instancias gubernamentales ambientales deben propiciar una vinculación con el sector académico de cada entidad o localidad para trabajar de manera conjunta, coordinada y multidisciplinaria para el logro de las metas adquiridas.

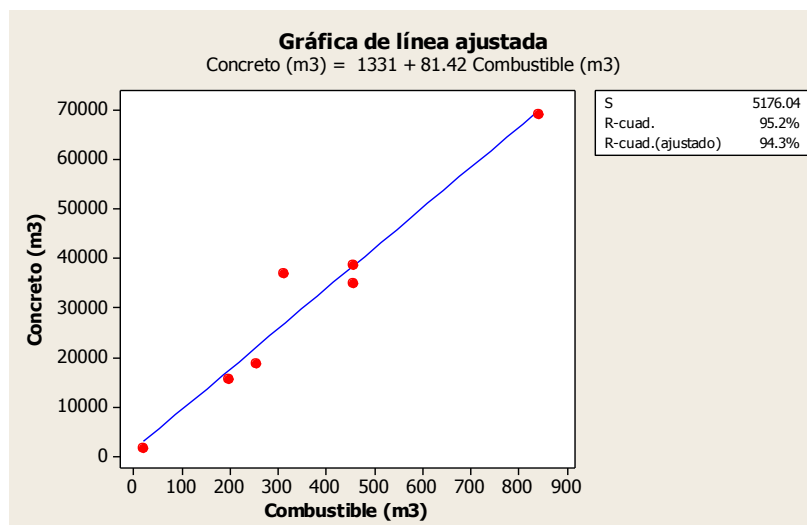
La reserva que guardan las dependencias de gobierno en relación con la disponibilidad de datos puntuales de las empresas, tales como su consumo de combustibles, materias primas y productos, entre otros, dificultan la investigación que se requiere llevar a cabo en proyectos en el ámbito de la gestión ambiental. Por esto, se sugiere que se lleven a cabo mecanismos de vinculación entre las instancias gubernamentales y el sector académico.

Anexos

Anexo 1



Ecuación ajustada de la producción nacional de piedra caliza y cal, periodo 1990- 2002 (datos bianuales).



Ecuación ajustada para la cantidad de combustible utilizado y la producción de concreto asfáltico (datos 2005).

Anexo 2

Principales ramas de los subsectores manufactureros de San Luis Potosí, incluidos en el análisis LMDI.

Industria alimentaria	Industrias del papel, impresión e industrias conexas	Industrias metálicas básicas	Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	Maquinaria y Equipo
Elaboración de alimentos para animales	Industria del papel	Industria básica del hierro y del acero	Fabricación de cal	Industria química	Fabricación de maquinaria y equipo
Molienda de granos y de semillas y obtención de aceites y grasas	Impresión e industrias conexas	Fabricación de productos de hierro y acero de material comprado	Fabricación de cemento y productos de concreto	Industria del plástico y del hule	Fabricación de equipo de computación, comunicación, y accesorios electrónicos
Elaboración de azúcares, chocolates, dulces y similares		Industrias de metales no ferrosos, excluye aluminio	Fabricación de artículos de alfarería, porcelana, loza y muebles de baño		Fabricación de equipo de generación de electricidad, aparatos y accesorios eléctricos
Conservación de frutas, verduras y alimentos preparados			Fabricación de productos a base de arcilla para la construcción		Fabricación de equipo de transporte
Elaboración de productos lácteos			Fabricación de vidrio y productos de vidrio		
Matanza, empaque y procesamiento de carne de ganado, aves			Fabricación de cal, yeso y productos de yeso		
Preparación y envasado de pescados y mariscos					
Elaboración de productos de panadería y tortillas					
Otras industrias alimentarias					

Anexo 3

Valores del PIB, la energía (BEP) y emisiones de CO₂ de los subsectores manufactureros de San Luis Potosí durante el periodo base 2000-2012.

Año	Industria alimentaria	Industria del papel	Industria química, del plástico y hule	Productos minerales no metálicos	Industrias metálicas	Maquinaria y equipo
PIB a precios de 2008 (miles de pesos)						
2000	10 976 302	1 427 861	3 486 403	4 295 299	11 547 966	16 192 918
2001	11 691 175	1 481 624	3 174 483	4 207 044	9 411 775	15 100 032
2002	11 958 258	1 508 870	3 268 376	4 740 504	8 655 571	16 159 914
2003	10 951 203	1 395 922	3 342 823	4 714 977	10 166 705	15 981 948
2004	12 506 535	1 384 064	2 942 122	5 188 072	10 441 577	18 322 690
2005	12 468 266	1 466 515	3 447 938	5 705 571	10 621 331	16 395 157
2006	12 430 334	1 640 969	3 219 731	6 381 660	11 934 488	16 634 921
2007	12 638 787	1 764 316	3 211 892	7 087 582	11 654 345	17 345 195
2008	13 159 952	1 637 352	2 932 068	6 386 885	11 935 584	18 470 955
2009	12 812 827	1 500 691	2 700 734	6 093 162	9 493 549	14 952 310
2010	13 658 620	1 744 830	2 757 032	5 804 219	10 000 264	20 126 992
2011	14 400 644	1 723 599	3 513 202	6 365 427	10 355 109	23 621 926
2012	14 158 133	1 719 958	4 090 479	6 903 666	13 003 715	28 332 637
Barriles equivalentes de petróleo (BEP)						
2000	1 564 724	403 306	141 512	1 746 788	3 599 459	485 037
2001	1 717 669	389 873	127 800	1 681 193	3 574 617	455 664
2002	1 748 958	400 928	109 307	1 767 786	3 703 206	492 991
2003	1 864 416	402 763	106 838	1 885 746	3 977 794	485 737
2004	1 912 948	433 143	126 341	2 236 120	4 152 255	582 012
2005	2 333 344	425 903	111 436	3 104 708	3 756 835	582 475
2006	1 876 822	434 217	107 669	3 283 586	3 987 218	645 490
2007	1 826 870	572 616	98 893	2 816 207	3 846 297	703 481
2008	2 135 011	567 335	132 803	3 181 299	4 322 441	457 182
2009	1 787 844	536 117	97 610	2 125 447	3 582 308	395 329
2010	1 470 510	295 338	137 996	2 718 651	4 694 718	505 490
2011	1 974 766	340 247	145 640	4 108 998	4 866 284	572 011
2012	1 358 024	502 174	158 923	4 081 300	4 890 694	708 195
Emisiones CO₂ (Toneladas)						
2000	861 353	171 469	67 114	722 164	1 286 952	156 273
2001	940 436	165 758	60 943	693 233	1 278 405	146 792
2002	962 724	170 458	52 715	804 526	1 324 372	158 816
2003	1 012 803	171 047	52 249	849 130	1 440 125	156 485
2004	1 029 273	184 151	62 654	1 028 702	1 485 072	187 526
2005	1 278 316	180 695	52 466	1 508 497	1 343 904	187 627
2006	1 019 612	184 222	55 817	1 594 484	1 426 572	207 925
2007	982 942	225 906	52 466	1 333 495	1 372 721	226 272
2008	1 171 652	224 211	67 830	1 565 015	1 539 054	147 699
2009	975 458	207 011	55 480	1 024 295	1 277 776	127 690
2010	791 572	98 826	75 801	1 246 278	1 673 792	163 415
2011	1 080 909	119 000	80 251	1 833 563	1 742 481	185 014
2012	728 789	190 905	89 405	1 807 761	1 747 104	229 006

Anexo 4

Valores de la intensidad de carbonización de la energía (c), la intensidad energética (e) y el PIB, para los subsectores manufactureros incluidos en la aplicación del método LMDI.

Año	Industria alimentaria			Industria del papel			Industria química, plástico y hule		
	c	e	r	c	e	r	c	e	r
2000	0,55048	0,14255	10 976 302	0,42516	0,28245	1 427 861	0,47426	0,04059	3 486 403
2001	0,54751	0,14692	11 691 175	0,42516	0,26314	1 481 624	0,47686	0,04026	3 174 483
2002	0,55046	0,14626	11 958 258	0,42516	0,26571	1 508 870	0,48227	0,03344	3 268 376
2003	0,54323	0,17025	10 951 203	0,42468	0,28853	1 395 922	0,48905	0,03196	3 342 823
2004	0,53806	0,15296	12 506 535	0,42515	0,31295	1 384 064	0,49591	0,04294	2 942 122
2005	0,54785	0,18714	12 468 266	0,42426	0,29042	1 466 515	0,47081	0,03232	3 447 938
2006	0,54327	0,15099	12 430 334	0,42426	0,26461	1 640 969	0,51841	0,03344	3 219 731
2007	0,53805	0,14454	12 638 787	0,39452	0,32455	1 764 316	0,53053	0,03079	3 211 892
2008	0,54878	0,16224	13 159 952	0,39520	0,34650	1 637 352	0,51076	0,04529	2 932 068
2009	0,54561	0,13954	12 812 827	0,38613	0,35725	1 500 691	0,56838	0,03614	2 700 734
2010	0,53830	0,10766	13 658 620	0,33462	0,16926	1 744 830	0,54930	0,05005	2 757 032
2011	0,54736	0,13713	14 400 644	0,34975	0,19740	1 723 599	0,55102	0,04146	3 513 202
2012	0,53665	0,0959	14 158 133	0,38016	0,29197	1 719 958	0,56256	0,03885	4 090 479
Año	Productos minerales no metálicos			Industria metálica básica			Maquinaria y equipo		
	c	e	r	c	e	r	c	e	r
2000	0,41342	0,40667	4 295 299	0,35754	0,31170	11 547 966	0,32219	0,02995	47 926 750
2001	0,41235	0,39961	4 207 044	0,35763	0,37980	9 411 775	0,32215	0,03018	45 066 133
2002	0,45510	0,37291	4 740 504	0,35763	0,42784	8 655 571	0,32215	0,03051	46 291 493
2003	0,45029	0,39995	4 714 977	0,36204	0,39126	10 166 705	0,32216	0,03039	46 553 578
2004	0,46004	0,43101	5 188 072	0,35765	0,39767	10 441 577	0,32220	0,03176	50 785 060
2005	0,48587	0,54415	5 705 571	0,35772	0,35371	10 621 331	0,32212	0,03553	50 104 778
2006	0,48559	0,51453	6 381 660	0,35779	0,33409	11 934 488	0,32212	0,03880	52 242 103
2007	0,47351	0,39734	7 087 582	0,35689	0,33003	11 654 345	0,32165	0,04056	53 702 117
2008	0,49194	0,49810	6 386 885	0,35606	0,36215	11 935 584	0,32306	0,02475	54 522 796
2009	0,48192	0,34882	6 093 162	0,35669	0,37734	9 493 549	0,32300	0,02644	47 553 273
2010	0,45842	0,46839	5 804 219	0,35653	0,46946	10 000 264	0,32328	0,02512	54 091 957
2011	0,44623	0,64552	6 365 427	0,35807	0,46994	10 355 109	0,32345	0,02422	59 979 907
2012	0,44294	0,59118	6 903 666	0,35723	0,37610	13 003 715	0,32337	0,02500	68 208 588

Anexo 5

Prueba de normalidad de D'Agostino para los índices de variación de los factores determinantes durante el periodo base 2000-2012 (Martin y Luna del castillo, 2004).

Estadístico de prueba:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \left(i - \left(\frac{n+1}{2} \right) \right) * x_i^*}{n^2 s_n}$$

Donde: n es el tamaño de la muestra; x_i^* son los datos ordenados; s_n es la desviación estándar.

1. Para el índice de variación de la intensidad de carbonización de la energía:

$$D = \frac{0,989584}{3,502991} = 0,282497$$

2. Para el índice de variación de la intensidad energética:

$$D = \frac{3,142337}{11,090451} = 0,283337$$

3. Para el índice de variación del PIB manufacturero:

$$D = \frac{3,027651}{10,895836} = 0,277872$$

Cada uno de los valores del estadístico D corresponde con los valores de la tabla de D'Agostino para $n=12$ (0,2653, 0,2841) del Anexo 5; se puede concluir que el valor de p es mayor de 0,20. Por lo tanto, no existe suficiente evidencia para rechazar las hipótesis de la normalidad de cada uno de los índices de estudio.

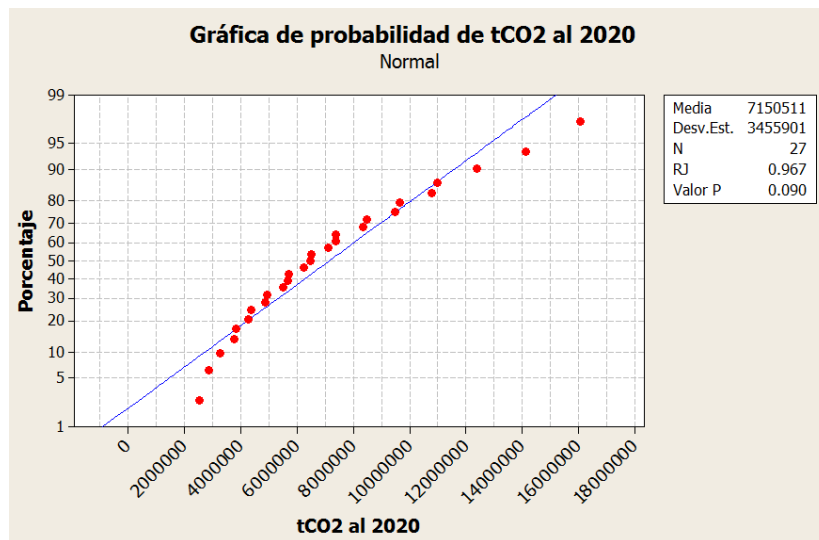
Anexo 6

Tabla de los valores de prueba de normalidad de D'Agostino (Martin y Luna del castillo, 2004).

n	valores de alfa									
	0.20		0.10		0.05		0.02		0.01	
10	0.2632	0.2835	0.2573	0.2843	0.2513	0.2849	0.2436	0.2855	0.2379	0.2857
12	0.2653	0.2841	0.2598	0.2849	0.2544	0.2854	0.2473	0.2859	0.242	0.2862
14	0.2669	0.2846	0.2613	0.2853	0.2568	0.2858	0.2503	0.2862	0.2455	0.2865
16	0.2681	0.2848	0.2634	0.2855	0.2587	0.286	0.2527	0.2865	0.2482	0.2867
18	0.269	0.285	0.2646	0.2855	0.2603	0.2862	0.2547	0.2866	0.2505	0.2868
20	0.2699	0.2852	0.2657	0.2857	0.2617	0.2863	0.2564	0.2867	0.2525	0.2869
22	0.2705	0.2853	0.267	0.2859	0.2629	0.2864	0.2579	0.2869	0.2542	0.287
24	0.2711	0.2853	0.2675	0.286	0.2638	0.2865	0.2591	0.287	0.2557	0.2871
26	0.2717	0.2854	0.2682	0.2861	0.2647	0.2866	0.2603	0.287	0.257	0.2872
28	0.2721	0.2854	0.2688	0.2861	0.2655	0.2866	0.2612	0.287	0.2581	0.2873
30	0.2725	0.2854	0.2693	0.2861	0.2662	0.2866	0.2622	0.2871	0.2592	0.2872
32	0.2729	0.2854	0.2698	0.2862	0.2668	0.2867	0.261	0.2871	0.26	0.2873
34	0.2732	0.2854	0.2703	0.2862	0.2674	0.2867	0.2636	0.2871	0.2609	0.2873
36	0.2735	0.2854	0.2707	0.2862	0.2679	0.2867	0.2643	0.2871	0.2617	0.2873
38	0.2738	0.2854	0.271	0.2862	0.2683	0.2867	0.2649	0.2871	0.2623	0.2873
40	0.274	0.2854	0.2714	0.2862	0.2688	0.2867	0.2655	0.2871	0.263	0.2874
42	0.2743	0.2854	0.2717	0.2861	0.2691	0.2867	0.2659	0.2871	0.236	0.2874
44	0.2745	0.2854	0.272	0.2861	0.2695	0.2867	0.2664	0.2871	0.2841	0.2874
46	0.2747	0.2854	0.2722	0.2861	0.2698	0.2866	0.2668	0.2871	0.2646	0.2874
48	0.2749	0.2854	0.2725	0.2861	0.2702	0.2866	0.2672	0.2871	0.2651	0.2874
50	0.2751	0.2853	0.2727	0.2861	0.2705	0.2866	0.2676	0.2871	0.2655	0.2874
60	0.2757	0.2852	0.2737	0.286	0.2717	0.2865	0.2692	0.287	0.2673	0.2873
70	0.2763	0.2851	0.2744	0.2859	0.2726	0.2864	0.2708	0.2869	0.2687	0.2872
80	0.2763	0.285	0.275	0.2857	0.2734	0.2863	0.2713	0.2868	0.2698	0.2871
90	0.2771	0.2849	0.2755	0.2856	0.274	0.2862	0.2721	0.2866	0.2702	0.287
100	0.2774	0.2849	0.2759	0.2855	0.2745	0.286	0.2727	0.2865	0.2714	0.2869
120	0.2779	0.2847	0.2765	0.2853	0.2752	0.2858	0.2737	0.2863	0.2725	0.2866
140	0.2782	0.2846	0.277	0.2852	0.2754	0.2856	0.2744	0.2862	0.2734	0.2865
160	0.2785	0.2845	0.2774	0.2851	0.2763	0.2855	0.275	0.286	0.2741	0.2863
180	0.2787	0.2844	0.2777	0.285	0.2767	0.2854	0.2755	0.2859	0.2746	0.2862
200	0.2789	0.2843	0.2779	0.2848	0.277	0.2853	0.2759	0.2857	0.2751	0.286
250	0.2793	0.2841	0.2784	0.2846	0.2776	0.285	0.2767	0.2855	0.276	0.2858
300	0.2796	0.284	0.2788	0.2844	0.2781	0.28448	0.2772	0.2853	0.2766	0.2855
350	0.2798	0.2839	0.2791	0.2843	0.2784	0.2847	0.2776	0.2851	0.2771	0.2853
400	0.2799	0.2838	0.2793	0.2842	0.2787	0.2845	0.278	0.2849	0.2775	0.2852
450	0.2801	0.2837	0.2795	0.2841	0.2789	0.2844	0.2782	0.2848	0.2778	0.2851
500	0.2802	0.2836	0.2796	0.284	0.2791	0.2843	0.2785	0.2847	0.278	0.2849
600	0.2804	0.2835	0.2799	0.2839	0.2794	0.2842	0.2788	0.2845	0.2784	0.2847
700	0.2805	0.2834	0.28	0.2838	0.2796	0.284	0.2791	0.2844	0.2787	0.2846
800	0.2806	0.2833	0.2802	0.2837	0.2798	0.2839	0.2793	0.2842	0.279	0.2844
900	0.2807	0.2833	0.2803	0.2836	0.2799	0.2838	0.2795	0.2841	0.2792	0.2843
1000	0.2808	0.2832	0.2804	0.2835	0.28	0.2838	0.2796	0.284	0.2793	0.2842
1250	0.2809	0.2831	0.2806	0.2834	0.2803	0.2836	0.2799	0.2839	0.2797	0.284
1500	0.281	0.283	0.2807	0.2833	0.2805	0.2835	0.2801	0.2837	0.2799	0.2839
1750	0.2811	0.283	0.2807	0.2832	0.2806	0.2834	0.2803	0.2836	0.2801	0.2838
2000	0.2812	0.2829	0.2809	0.2831	0.2807	0.2833	0.2804	0.2835	0.2802	0.2837

Anexo 7

Estadístico de Ryan-Joiner, para probar la normalidad de los datos de las emisiones generadas en los escenarios del 2020.



Resumen descriptivo de los datos de las emisiones generadas por los escenarios del 2020.

