

ENERGÍA INCORPORADA Y EMISIONES DE CO₂ EN LA EDIFICACIÓN

**Metodología para Evaluación del Nivel de
Sustentabilidad de Materiales de Construcción.**

Caso de estudio: el acero

FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ AYÓN

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



México, D.F., Noviembre de 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ENERGÍA INCORPORADA Y EMISIONES DE CO₂ EN LA EDIFICACIÓN

**Metodología para Evaluación del Nivel de
Sustentabilidad de Materiales de Construcción.**

Caso de estudio: el acero

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Arquitectura presenta:

FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ AYÓN

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



México, D.F., Noviembre de 2009

Bajo la dirección de:

Dr. David Morillón Galvéz

Sinodales:

Dra. Dolores Ana Flores Sandoval

Dr. Pedro Sunyer Martín

Dr. José Diego Morales Ramírez

M. en Arq. Francisco Reyna Gómez

Dedicado con todo mi cariño a mis pequeños hijos:

Javi, Juan Pablo y Gabriel.

Mi más grande agradecimiento a mi esposa Samantha, por su invaluable apoyo.

*Con agradecimiento especial a mi Madre y a cada uno de mis incondicionales
hermanos y hermanas.*

Estoy muy agradecido por todo el apoyo brindado por el Dr. David Morillón, director de este trabajo, quien con firmeza supo guiar mi camino; por los valiosos comentarios de la Dra. Ana Flores y del Dr. Pedro Sunyer, que permitieron encausar el presente trabajo; y por las acertadas sugerencias y recomendaciones del Dr. Diego Morales y del M. en Arq. Francisco Reyna.

Gracias a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron con un comentario, un consejo, una oración, o que simplemente escucharon pacientemente a un servidor; y gracias por último a Dios, quien permitió que todo esto fuera posible.

Contenido

<i>Resumen</i>	v
<i>Abstract</i>	v

INTRODUCCIÓN

<i>El problema: rebasar los límites de capacidad de carga de la Tierra</i>	1
<i>Objetivo e hipótesis</i>	13
<i>Estructura del documento</i>	15

CAPÍTULO 1. LA ENERGÍA INCORPORADA EN LA EDIFICACIÓN

1.1 Antecedentes	16
1.1.1 El análisis de energía incorporada	16
1.1.1.1 Método de análisis del proceso	17
1.1.1.2 Método de análisis de entradas y salidas (input-output)	18
1.1.1.3 Métodos de análisis híbridos	19
1.1.2 El Análisis del Ciclo de Vida (ACV)	21
1.1.2.1 Origen y evolución del ACV	22
1.1.2.2 Metodología del ACV	23
1.1.2.3 El ACV en el sector de la edificación	27
1.1.3 Trabajos de investigación realizados	31
1.2 Análisis crítico de antecedentes	34

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

2.1 Grado de Emisión Energética de CO ₂	37
2.2 Capacidad de carga y sustentabilidad	41
2.3 Capacidad de Carga Óptima de CO ₂	46
2.3.1 Cálculo para México de la Capacidad de Carga Óptima de CO ₂	49

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (MEMAC)

3.1 Descripción de la MEMAC	52
3.1.1 Objetivo y Alcance del estudio	53
3.1.2 Análisis del Inventario	57
3.1.2.1 Cálculos preliminares	58
3.1.2.2 Cálculo de procesos unitarios	61
3.1.2.3 Concentrado de procesos	62
3.1.3 Evaluación	62
3.1.4 Interpretación	63
3.2 Características de la MEMAC	63

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SUSTENTABILIDAD DEL ACERO

4.1 Definición del Objetivo y Alcance	65
4.1.1 Objetivo del estudio	65
4.1.1.1 Aplicación prevista	65
4.1.1.2 Razones para realizar el estudio	65
4.1.1.3 Público objetivo	66
4.1.2 Alcance del estudio	66
4.1.2.1 El sistema del producto	66
4.1.2.2 Descripción de procesos	69
4.1.2.3 Unidad funcional	72
4.1.2.4 Límite del sistema (criterios de inclusión)	72
4.2 Análisis del inventario	78
4.2.1 Cálculos preliminares	78
4.2.1.1 Cálculo de factor de emisión de CO ₂ de producción de electricidad	78
4.2.1.2 Cálculo de factor de emisión de CO ₂ de extracción en minas	79
4.2.1.3 Cálculo de factor de emisión de CO ₂ de autotransporte de carga	80
4.2.1.4 Cálculo de factor de emisión de CO ₂ de transporte ferroviario	80
4.2.1.5 Calidad de los datos utilizados	81

4.2.2 Cálculo de procesos unitarios	83
4.2.2.1 <i>Cálculo de procesos individuales</i>	86
4.2.2.2 <i>Cálculo de procesos del sistema</i>	92
4.2.2.3 <i>Calidad de los datos utilizados</i>	100
4.2.3 Concentrado de procesos	102
4.3 Evaluación	107
4.3.1 Análisis de integridad	107
4.3.2 Análisis de sensibilidad	109
4.3.3 Análisis de coherencia	116
4.3.4 Análisis de resultados	118
4.4 Interpretación	120
CONCLUSIONES	121
BIBLIOGRAFIA	130

Resumen

La atmósfera de nuestro planeta se encuentra actualmente en una situación crítica, ya que la cantidad de emisiones de CO₂ que es arrojada a ella, ha rebasado la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra. Los materiales de construcción durante las etapas de Extracción, Transporte y Fabricación (Proceso de Producción), provocan un alto impacto ambiental generado por la energía incorporada y sus emisiones de CO₂ de origen fósil, sin embargo, no existe una metodología que evalúe los efectos de estos elementos con relación a la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra. En respuesta a lo anterior, se desarrolla una Metodología de Evaluación de Materiales de Construcción (MEMAC) basada en la normatividad del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), la cual permitió evaluar el nivel de sustentabilidad de dos tecnologías de producción de acero en México como caso de aplicación, demostrándose que es posible determinar el nivel de sustentabilidad de materiales de construcción durante su Proceso de Producción (visión parcial del ciclo de vida, llamada “*de la cuna a la puerta*”), por medio del análisis de la energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil, y su comparación con la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra.

Abstract

The atmosphere of our planet is at the moment in a critical situation, since the amount of CO₂ emissions that are thrown to it, has exceeded the lifting capacity of the Earth carbon drains. The building materials during the stages of Extraction, Transport and Manufacture (Production Process), cause a high environmental impact generated by the embodied energy and their CO₂ emissions from fossil origin, nevertheless, do not exist a methodology that evaluates the effects of these elements in relation to the lifting capacity of the Earth carbon drains. In answer to the previous thing, cradle in the normatively of the Life Cycle Assessment (LCA), is developed a Methodology of Evaluation of Materials of Construction (MEMAC), which allowed to evaluate the level of sustainability of two technologies of steel production in Mexico as case of application, being demonstrated itself that it is possible to determine the level of sustainability of building materials during its Production Process (partial view of the life cycle, called “*cradle to the door*”), by means of the analysis of the embodied energy and emissions of CO₂ of fossil origin, and its comparison with the lifting capacity of the Earth carbon drains.

“Hoy sentimos la urgencia de establecer con la Tierra una paz permanente. Hace siglos que estamos en guerra contra ella. Nos hemos enfrentado a ella de mil maneras intentando dominar sus fuerzas y aprovechar al máximo sus servicios. Hemos conseguido victorias, pero a un precio tan alto que parece que ahora la Tierra quiere volverse contra nosotros. No tenemos ninguna posibilidad de salir ganando. Por el contrario, las señales nos dicen que tenemos que cambiar, si no, ella podrá continuar bajo la benéfica luz de sol, pero sin nuestra presencia”.

Leonardo Boff, 2008.

INTRODUCCIÓN

El problema: rebasar los límites de capacidad de carga de la Tierra

Desde el punto de vista económico y tecnológico, la energía es esencial para el desarrollo de las sociedades. Es un recurso demandado para la satisfacción de necesidades en la producción de bienes y servicios y proporcionar bienestar. En la antigüedad se dependió de la fuerza muscular de hombres y animales para la satisfacción de estas necesidades, hasta que aparecieron los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas), que constituyeron un suministro de energía tan rico, que la población mundial se duplicó cada medio siglo (Odum, 2006).

Sin embargo, el progreso que ha traído consigo la utilización de combustibles fósiles para producir energía, no ha venido solo; lo han acompañado también, impactos negativos al ambiente. La combustión de este tipo de recurso, genera emisiones a la atmósfera de gases como el dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico¹, el cual, desde el Antropoceno², el hombre lo ha estado desechando a la atmósfera con mayor velocidad de lo que los sumideros de carbono de la Tierra (bosques y océanos) lo han podido eliminar, por lo que el exceso acumulado en la atmósfera gradualmente está contribuyendo al calentamiento de la Tierra. En este sentido el Panel de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) reconoce: *“Las actividades humanas contribuyen al cambio climático provocando cambios en la atmósfera terrestre en cuanto a las cantidades de gases de efecto invernadero, aerosoles (partículas pequeñas) y la nubosidad. La mayor contribución conocida proviene de la combustión de combustibles fósiles, que libera el gas de dióxido de carbono a la atmósfera”*.

¹ Los gases que contribuyen al efecto invernadero pueden tener dos causas, la variabilidad natural y la actividad humana. En términos del Glosario del IPCC de 2007, los gases de efecto invernadero de origen antropogénico se refieren a aquellos resultantes de la actividad de los seres humanos o producidos por éstos.

² De acuerdo con Duarte (2006), los cambios provocados por el hombre en los sistemas naturales de la Tierra han dado lugar a hablar de una nueva era geológica en la historia del planeta llamada Antropoceno, la cual habría empezado a finales del siglo XVIII con el invento de la máquina de vapor, el inicio de la industrialización con combustibles fósiles, la explosión demográfica y el inicio del aumento de las concentraciones de CO₂ y metano en la atmósfera.

La Tierra tiene una capacidad limitada para regenerar los subproductos derivados de la explotación humana del planeta, como fue reconocido por la Comisión Brundtland en 1987, en el informe conocido como *Nuestro futuro común*. En general, se acepta que, desde una concepción economicista del medio natural, no se deben extraer más recursos de los que la naturaleza puede restablecer. En este mismo sentido, no se deberían realizar más emisiones³ a la atmósfera de las que la Tierra puede eliminar, o de lo contrario se estará excediendo la capacidad de absorción y almacenamiento del océano y biosfera terrestre (*capacidad de carga de los sumideros de carbono*⁴) y alterando su funcionamiento. Sin embargo, un comparativo del Presupuesto de Carbono Mundial (PCM) de las últimas décadas, nos muestra, que la cantidad de CO₂ que emite el hombre a la atmósfera, rebasa dicha *capacidad de carga de los sumideros de carbono* de la Tierra, y está contribuyendo a alterar su funcionamiento.

De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007), el PCM para la década de 1990, se constituyó de la siguiente manera (Gráfica 1): las emisiones totales (producto de la combustión de combustibles fósiles y por el flujo de cambio en el uso de la tierra) alcanzaron 8 Gigatoneladas de Carbono (GtC)⁵ por año. De éstas, 3.2 GtC (40%) se quedaron en la atmósfera, mientras que el 60% restante lo absorbieron y almacenaron los *sumideros de carbono*.

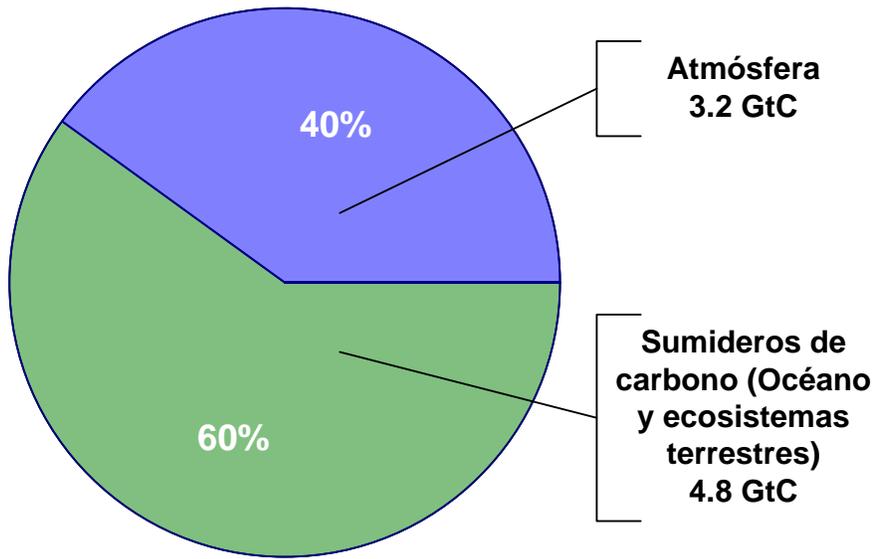
En el periodo de 2000 a 2007, de acuerdo con el Global Carbon Project (GCP, 2008), se emitieron a la atmósfera en promedio 10 GtC por año, de las cuales el 45% se quedó en la atmósfera y el 55% restante fue absorbido y almacenado por los *sumideros de carbono* (Gráfica 2). De acuerdo con estos datos, dichos *sumideros de carbono* del planeta redujeron su capacidad de absorción y almacenamiento en un 5%, con respecto a la década de 1990.

³ De acuerdo con el Glosario de Términos de Cambio Climático del Instituto Nacional de Ecología (INE), en el contexto de cambio climático, el término “emisiones” se refiere, a la liberación de gases de efecto invernadero, sus precursores y aerosoles hacia la atmósfera en un área específica por un periodo de tiempo.

⁴ Los sumideros de carbono son definidos por el IPCC (2007) como todo proceso, actividad o mecanismo que sustrae de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol, o un precursor de cualquiera de ellos. Se refieren a los bosques y a los océanos de la Tierra.

⁵ 1 GtC = mil millones de toneladas de carbono.

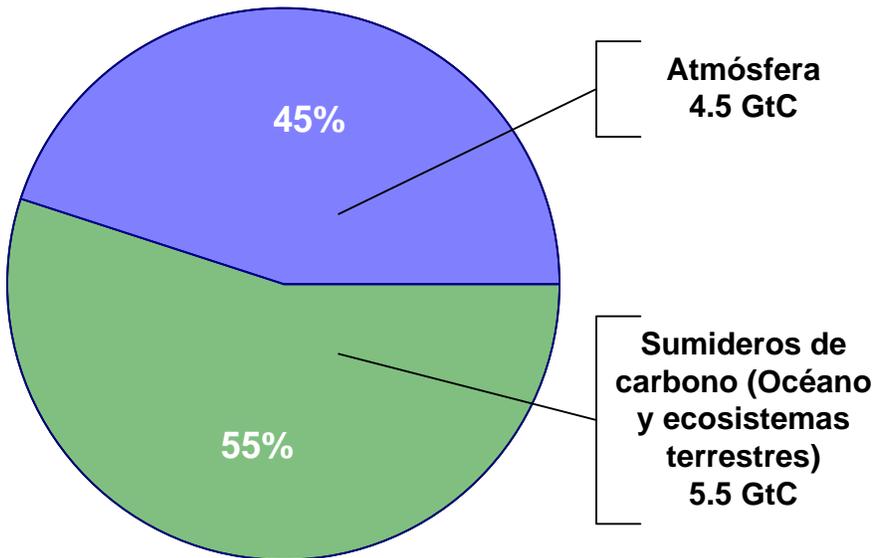
Gráfica 1. Comparativo de Presupuesto de Carbono Mundial. Década de 1990.



**Presupuesto Mundial de Carbono
Periodo 1990 - 1999**

Fuente de los datos: Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007)

Gráfica 2. Comparativo de Presupuesto de Carbono Mundial. Periodo 2000 – 2007.



**Presupuesto Mundial de Carbono
Periodo 2000 - 2007**

Fuente de los datos: Global Carbon Project (2008)

Cuando los *sumideros de carbono* son superados en su capacidad de absorción y eliminación por gases que tienen la propiedad de retener parte de la energía que emite el suelo al haber sido calentado éste por la radiación solar (gases de efecto invernadero), éstos comienzan a acumularse en la atmósfera, obstaculizando cada vez más la salida de energía hacia el espacio exterior, y provocando con ello, un aumento gradual de la temperatura media del planeta. A esto se le llama *calentamiento global*. Este calentamiento a su vez influye en el sistema atmosférico de la Tierra, y puede cambiar las condiciones climáticas en una escala regional o global, lo cual se conoce como *cambio climático*⁶.

Según la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC, 2007), el *cambio climático* se perfila como el problema ambiental más trascendente de este siglo y uno de los mayores desafíos globales que enfrenta la humanidad. Así mismo, las Naciones Unidas (NU, 1992), reconocen la preocupación por el calentamiento global provocado por el continuo aumento en la concentración de gases de efecto invernadero de origen antropogénico en la atmósfera, el cual puede afectar adversamente, a los ecosistemas naturales y a la humanidad.

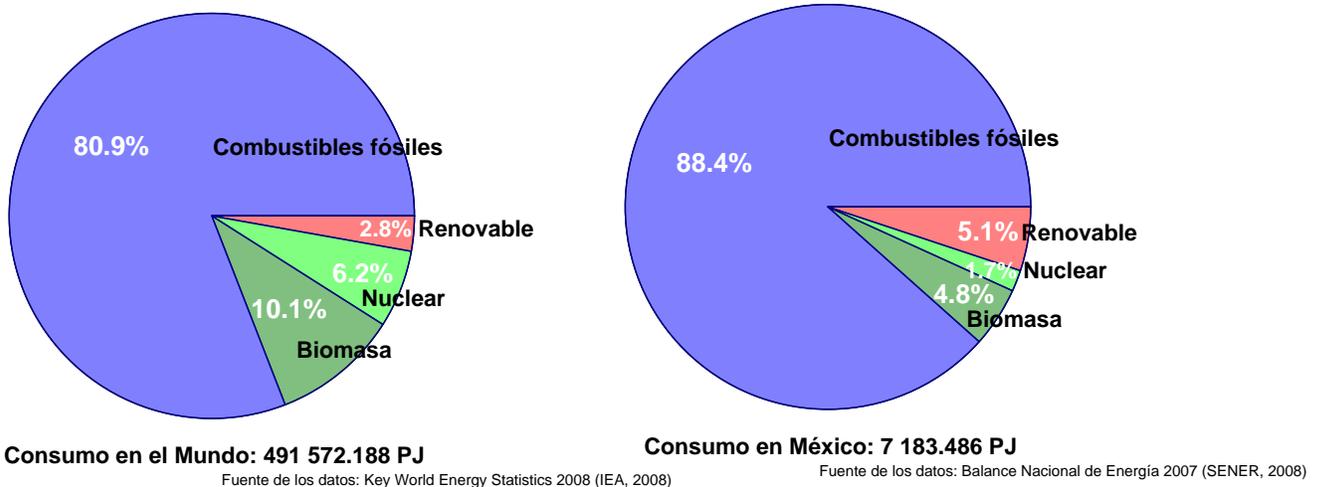
De acuerdo con el informe “*Presupuesto de Carbón 2007*” del Global Carbon Project (2008), en el 2007 se alcanzaron 383 partes por millón (ppm) de CO₂ en la atmósfera. Un 37% más que al inicio de la revolución industrial en 1750, cuando se tenían 280 ppm. Es la más alta concentración de los últimos 650,000 años, y probablemente, de los últimos 20 millones de años. El promedio anual en 2006 fue de 1.8 ppm, mientras que en 2007 se incrementó a 2.2 ppm.

⁶ Mientras que el Panel de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) se refiere a “cambio climático” como aquel “*producido durante el transcurso del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o a la actividad humana*”, en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (ONU, 1992), se define “cambio climático” en función de la acción humana: “*por cambio climático se entiende 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*”. En el presente documento, nos referiremos al cambio climático según esta última definición.

Según el mismo informe, el promedio de emisiones alcanzadas en el periodo de 2000 a 2007, superó los peores escenarios configurados por el Panel de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) para el periodo 2000 – 2010. Los esfuerzos realizados hasta el momento a nivel global, según parece, no han sido suficientes, y si no se rectifica a tiempo, las consecuencias también podrían ser mayores que las peores previstas.

De acuerdo con su origen, y según la clasificación hasta el momento realizada por los sectores de generación de energía, la *energía* que se consume en el mundo se puede clasificar en cuatro tipos diferentes, estos son: energía de *combustibles fósiles*, energía renovable, energía nuclear y energía procedente de la biomasa. Entre estas, la *energía* que procede de los *combustibles fósiles* es la que se consume en una proporción mayoritaria, la cual libera también con mayor importancia el gas CO₂ a la atmósfera (Gráfica 3).

Gráfica 3. Consumo de energía por tipo de fuentes en México y el Mundo. Año 2006.

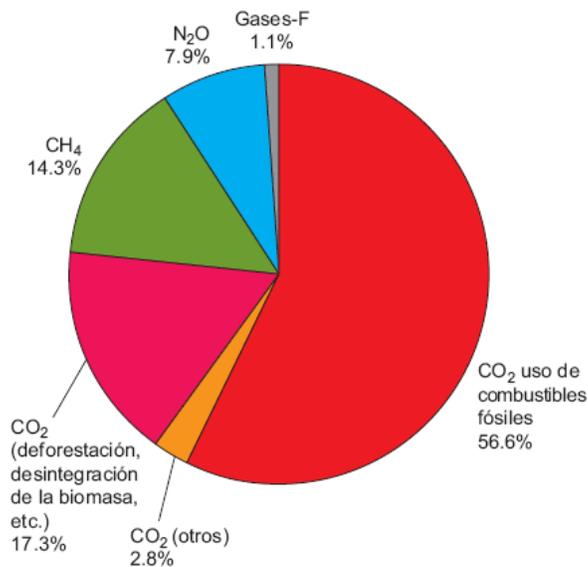


Nota: La energía producida con biomasa se considera energía renovable no limpia o contaminante, por la emisión de CO₂ que produce al quemarse esta, Por esta razón, su porcentaje de participación se toma en cuenta separado del resto de energías renovables.

En la actualidad, la mayoría de las economías se mueven por el uso de *combustibles fósiles*, los cuales se extraen de la naturaleza para producir *energía*.

De acuerdo con las Directrices del IPCC (2006: Vol. II, 1.1), el sector *energético* suele ser el más importante de los inventarios de emisiones de GEI, ya que en países con mayor desarrollo económico la contribución de éste sector puede alcanzar hasta el 75% del total de estas emisiones, de la cuales, el CO₂ normalmente representa el 95%, mientras que el metano y el óxido nitroso son responsables del porcentaje restante (Gráfica 4). Cerca del 80% del total de emisiones de GEI corresponden a emisiones de CO₂ y de estas, el sector *energético* comúnmente aporta más del 90%.

Gráfica 4. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicos en 2004.



Fuente: (IPCC, 2007: Impactos Adaptación y Vulnerabilidad).

En México, el consumo de *energía*, y por lo tanto, las *emisiones de CO₂* por la quema de *combustibles fósiles*, son también importantes. De acuerdo con las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), cada año la población total del país aumenta, y según las estadísticas del Balance Nacional de Energía que publica la Secretaría de Energía (SENER), el hábito de consumo energético de la población mexicana, también, ocasionando que la cantidad de *emisiones de CO₂* per cápita producidas por consumo de *energía* en México aumentara de 3.7 en 1990 a 3.9 ton CO₂/hab en 2004 (Tabla 1).

Tabla 1. Emisiones de CO₂ (sin cambio de uso de suelo) en México y clasificación por consumo de energía periodo 1990-2004

México	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Mt CO ₂	305	315.3	320.1	321.1	342.1	326.3	337.9	356.3	378.2	367.9	384	380.3	388	390.4	394.2
% del total mundial	1.44	1.48	1.52	1.50	1.59	1.48	1.48	1.56	1.64	1.59	1.62	1.60	1.59	1.53	1.48
ton CO ₂ /per	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8	3.6	3.7	3.8	4	3.8	3.9	3.8	3.9	3.9	3.9
Rank (emisiones de CO ₂)	14	14	14	15	14	15	14	13	13	13	13	13	13	13	13
Rank (consumo de energía)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

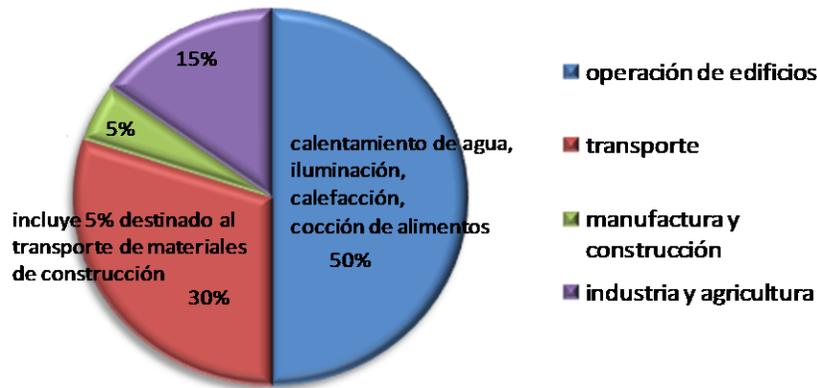
Los registros⁷ anteriores clasifican a nuestro país entre los primeros 15 países del mundo más consumidores de energía y con más emisiones de CO₂. Fuente: Elaboración propia con datos del World Resources Institute (WRI, 2008).

En el mismo periodo, el porcentaje de participación de *emisiones de CO₂* de México con respecto al total mundial, aumentó de 1.44% a 1.48%, lo que representó pasar de la clasificación 14 a la 13 mundial en el 2004.

En las *ciudades* de países con mayor desarrollo económico, el consumo de energía resulta alarmante. De acuerdo con Edwards (2005:21) “*Las ciudades, por lo tanto, son responsables del 75-80% de todas las emisiones de CO₂ que produce el hombre, y constituyen la principal causa del calentamiento global*”, esto incluye el consumo empleado en edificios para calentamiento de agua, iluminación, calefacción y cocción de alimentos, así como la energía generada por el transporte de personas y mercancías a esos edificios. Resalta dentro de éstas, el sector de la *edificación*, ya que, dentro del consumo energético total en dichos países (Gráfica 4), demanda una proporción mayoritaria de energía (50%), destinada a la operación de edificios (calentamiento de agua, iluminación, calefacción, cocción de alimentos). El transporte comúnmente alcanza una tercera parte del consumo de energía, del que el 5% tiene relación con la edificación (destinado al transporte de materiales de construcción). Un 5% adicional es utilizado para la manufactura y construcción. El resto (15%) se reparte entre industria y agricultura.

⁷ Las fuentes de los datos mexicanos reportados por el CAIT, proceden de: datos de 1891 a 1970 del Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) y datos de 1971 a 2005 de International Energy Agency (IEA).

Gráfica 4. Consumo típico de energía en países con mayor desarrollo económico.



Fuente: Elaboración propia con datos de 2004 de la Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC) (2004: Environmental Framework, 3).

Un sector importante dentro del *sector de la edificación* es el residencial, el cual en México demanda el 15.6% del consumo final total de energía para cocción de alimentos, calentamiento de agua, calefacción, iluminación y planchado. Consume más de una cuarta parte de la electricidad total y el 63.4% del gas LP (SENER, 2007). En el 2002, las emisiones de CO₂ provenientes del sector residencial por consumo de combustibles fósiles representaron el 4.9% del total nacional⁸ (INESEMARNAT, 2006). Por otro lado, de acuerdo con la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), para el 2030 habrá cerca de 42 millones de hogares, lo cual representa la construcción de 650 mil viviendas al año en promedio (CONAVI, 2008a: 11). El impacto ambiental esperado durante todo el ciclo de vida⁹ de las futuras viviendas es en verdad preocupante, ya que sólo por la etapa de uso y sin considerar consumo de electricidad, se estarán generando 569,354.5 toneladas de CO₂ cada año¹⁰, lo que equivale a la acción neta de secuestro de carbono de más de 750 mil hectáreas de bosques por año¹¹, aproximadamente.

⁸ Según datos de 2002: 19,277.118 Gg de CO₂ del sector residencial, de un total de 39,3532.45 Gg de CO₂ totales.

⁹ El concepto de ciclo de vida implica una visión completa de las etapas por las que transcurre una edificación, de manera general se pueden identificar las siguientes etapas: extracción de materias primas, transporte a la fábrica, producción de materiales, transporte a obra, construcción, operación y mantenimiento, y demolición.

¹⁰ 875.93 kg de CO₂ por vivienda, según datos de 2000: 19,506 Gg de CO₂ del sector residencial (INESEMARNAT, 2005) y 22'268,918 hogares (INEGI, 2000).

¹¹ Se tomó como referencia el valor de secuestro de 0.7577 ton de CO₂ por hectárea de bosque, calculado con la siguiente información: Absorción de carbono neta (emisión menos secuestro) de los bosques, promedio

Desde el punto de vista económico, el sector de la construcción, el cual incluye la edificación y obras de ingeniería civil entre otras, mantiene un estrecho vínculo con los *materiales de construcción*, ya que el dinamismo económico de aquel posibilita la activación de diversas ramas industriales de manera directa, entre las que destacan las del hierro y el acero, cemento, cal, yeso, productos a base de arcilla, maquinaria y equipo, entre otras (Amador, 2009). De acuerdo con este autor, el sector de la edificación es considerado como uno de los motores principales de la economía del país, el cual ha logrado mantenerse estable pese a la crisis económica internacional que se ha sufrido en los últimos años.

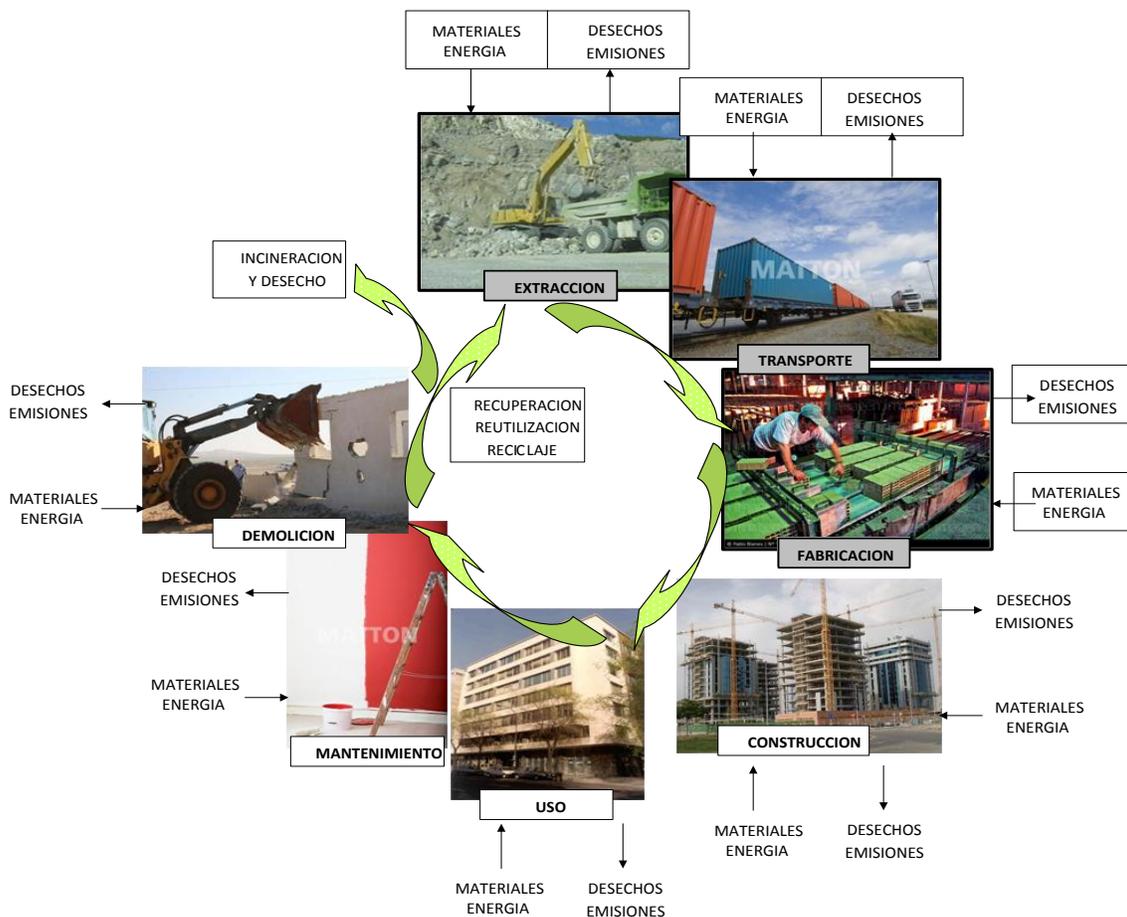
El sector de la edificación en México incrementó su participación en la industria de la construcción, de 48.8% en el 2006 a 61.3% en 2008, lo que contribuyó a que el sector de la construcción creciera económicamente de 2002 a 2007, a una tasa anual promedio de 4.1%, mientras que toda la economía en general lo hizo a 3.2%. La estabilidad económica del sector de la edificación y su dinámica actividad, ha provocado una constante demanda de *materiales de construcción*, los cuales, tienen un impacto ambiental importante durante todas sus etapas de producción, causado por el consumo de combustibles fósiles para producir energía (entre otros factores), los cuales como ya vimos, tienen una participación protagónica en la emisión de CO₂ a la atmósfera.

Una visión importante dentro del ciclo de vida de la edificación, lo constituye el *Proceso de producción* de materiales, mismo que abarca tres etapas principales (Figura 1): extracción, transporte y fabricación de productos. La etapa de extracción y generación de materias primas basa su actividad en el uso de combustibles fósiles para producir energía.

anual del periodo 2000-2007: 1.1 Gg carbono (FUENTE: CGP, Carbon Budget, 2007) y Promedio de hectáreas de bosques y otras tierras boscosas en el mundo, año 2005: 5'327,854 mil hectáreas (FUENTE: FAO, Evaluación de los recursos forestales mundiales, 2005).

De acuerdo con la Secretaría de Economía y la Coordinación General Minera (SE-CGM, 2008), del total de la energía demandada en esta etapa por la actividad minera en general, el 45% la obtienen del gas seco, el cual representa el 10.7% del total del sector industrial; un 29% proviene de la electricidad¹²; el 18% lo obtienen de la quema de derivados del petróleo y el 8%, del coque de carbón.

Figura 1. Etapas del ciclo de vida de la edificación



Nota: Las etapas de Extracción y generación de materias primas, Transporte y Fabricación de materiales, constituyen el Proceso de Producción de materiales (visión parcial del ciclo de vida llamada "de la cuna a la puerta"). Fuente: Elaboración propia.

¹² De acuerdo con la SENER (2008), casi el 80 por ciento de la electricidad generada en el país, es producida en centrales térmicas. El 93.5 por ciento de la energía requerida en dichas centrales térmicas, utiliza combustibles fósiles.

La etapa de Transporte, se relaciona con el traslado de materias primas a la fábrica en autotransporte de carga o en tren. Según la SENER (2007), el uso de combustibles fósiles derivados del petróleo proporciona a la actividad de transporte en general el 99.9% de la energía requerida; el resto la obtiene del gas natural.

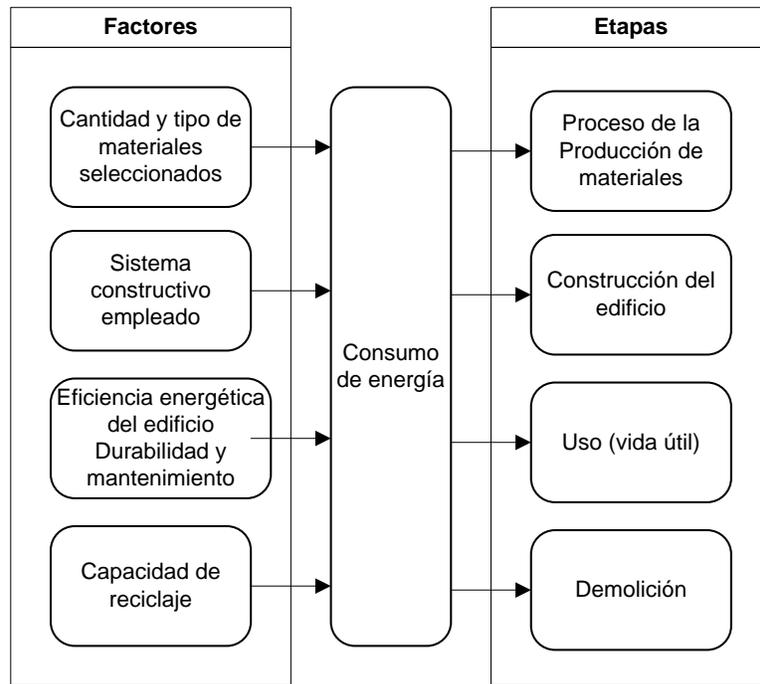
La fabricación representa igualmente otra etapa del Proceso de producción de materiales con importante repercusión medioambiental causada por el uso de combustibles fósiles necesarios para conseguir el producto adecuado. De acuerdo con la SENER (2008), el 51.7% de la energía consumida por la industria siderúrgica proviene del gas seco, lo que representa el 29.4% del total del sector industrial, constituyéndose por esta razón, en la principal consumidora de gas seco de este sector. Es también la principal consumidora de electricidad, con un 7.3% del total del sector industrial.

La industria del cemento, basa su consumo de energía en los petrolíferos, con un 80.8% del total de energía consumida. Es la principal consumidora de combustóleo, la cual alcanza un 21.2% del total del sector industrial; su consumo total de energía es el mayor del sector industrial, y casi alcanza el 11% del total del sector.

El 71.7% del consumo de energía del aluminio, se basa en la electricidad. El 85.4% del consumo de energía del vidrio, utiliza gas seco. El efecto medioambiental del consumo de energía en los procesos de fabricación de materiales se traduce, pues, en emisiones a la atmósfera de CO₂.

A la suma de los diferentes consumos de energía que se realizan en cada una de las etapas del ciclo de vida de una edificación se le llama *energía incorporada*, y está determinada por aspectos muy variados, entre ellos, se pueden señalar los siguientes (Figura 2):

Figura 2. Etapas del ciclo de vida de la edificación y algunos factores que influyen en el consumo de energía total (energía incorporada).



- El consumo de energía en una edificación, durante el Proceso de Producción de sus materiales de construcción, depende de la cantidad y tipo de los materiales seleccionados.
- En la etapa de construcción del edificio el consumo de energía lo determina el sistema constructivo empleado.
- En la etapa de uso el consumo de energía obedece a la eficiencia energética del edificio, a la durabilidad y al mantenimiento de los materiales utilizados.
- La capacidad de reciclaje condiciona la cantidad de energía consumida en la etapa de demolición.

Es en la etapa de diseño del edificio donde estos aspectos, entre otros, son definidos, y por lo tanto, donde se decide la cantidad total de energía que consumirá el futuro edificio (energía incorporada). En México, desafortunadamente, la cantidad de *energía incorporada* que alcanzará un edificio se resuelve aún de manera acrítica.

Objetivo e hipótesis

Dentro de la responsabilidad ambiental que demanda el desarrollo sustentable en términos de su definición en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro en 1992¹³, la humanidad enfrenta *el reto* de avanzar hacia la *sustentabilidad*. En este sentido, y de acuerdo con la problemática planteada, *el reto* está en alcanzar un razonable equilibrio entre *energía incorporada* y emisiones de CO₂ de origen fósil y la *capacidad de carga de los sumideros de carbono* del planeta.

Los esfuerzos por estimar y evaluar el impacto ambiental de la *energía incorporada* de materiales de construcción y sus emisiones de CO₂ de origen fósil relacionadas, desafortunadamente han sido pocos en México¹⁴ y aquellos que evalúen *el reto* anteriormente planteado de considerar la relación de los factores mencionados (energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil) con *la capacidad de carga de los sumideros de carbono* de la Tierra, prácticamente son inexistentes.

En los términos planteados de capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra, no se sabe qué impacta más, el acero o el concreto; cuánto impacta a lo largo de su Proceso de producción el aluminio, el vidrio o cualquier otro material de construcción; se desconoce qué nivel de consumo de energía y de emisiones de CO₂ de origen fósil se puede considerar aceptable desde un punto de vista sustentable (nivel de sustentabilidad).

¹³ En ella se habla de conciliar las esferas: social, económica y ecológica.

¹⁴ Son muy pocos los trabajos que actualmente existen en México que analicen la energía incorporada y emisiones de CO de materiales de construcción, algunos de ellos son: Life Cycle Inventory of Concrete, Asphalt and Calyeso Roads at Tamuin, S.L.P., México, desarrollado por la Dra. Elisa Cobas Flores en 2002 (Cobas, 2002), y Mitigation Strategies for Greenhouse gases on Cement Sector, elaborado recientemente por el Centro Mario Molina (CMM, 2008). Sin embargo, no consideran estos, evaluación de impactos ambientales con base en la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra.

Elaborar un camino para determinar y evaluar el *nivel de sustentabilidad* de los materiales de construcción durante su Proceso de producción, será uno de los objetivos a alcanzar en la presente investigación, el cual posibilitará la visualización del acierto o desacierto en el consumo de energía y emisiones de CO₂ de origen fósil, facilitará por su comparación con otros materiales, la toma de decisiones para su utilización y proporcionará información para el control y las acciones de reducción del impacto.

Ante el problema que representa la edificación en el cambio climático, resulta importante conocer el impacto ambiental del Proceso de producción de materiales de construcción. No podemos decir que diseñamos y construimos edificios sustentables si no sabemos cómo afectan los materiales de construcción al ambiente.

Se necesita generar información básica de energía incorporada y emisiones de CO₂ de materiales de construcción durante el Proceso de Producción, que ayuden a tomar decisiones más adecuadas respecto de la capacidad de carga de nuestro planeta. Para esto, es necesario *contar con una metodología de análisis de energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil de materiales de construcción, que señale cuándo se ha rebasado el límite de capacidad de carga de nuestro ambiente en la evaluación de su nivel de sustentabilidad*. El desarrollo de una metodología con esas características es el objetivo principal de la presente investigación.

Por medio de la elaboración y aplicación de la metodología de evaluación al caso de estudio de un material de construcción, se podrá validar la hipótesis siguiente: *es posible evaluar el nivel de sustentabilidad de materiales de construcción por medio del análisis de energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil durante su Proceso de producción, y su comparación con la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra*.

Estructura del documento

En el capítulo uno del presente documento, se presentan los antecedentes relacionados con el objetivo de la investigación anteriormente expuesto. Se exponen las metodologías existentes para el análisis de energía incorporada y emisiones de CO₂ en materiales de construcción, y trabajos de investigación realizados que evalúen el impacto ambiental de materiales de construcción. Al final del capítulo, se realiza un análisis crítico de los mismos para identificar potenciales acercamientos a la evaluación del nivel de sustentabilidad de los materiales de construcción.

En el capítulo dos, se exponen los fundamentos teóricos en los que se basa la Metodología de Evaluación de Materiales de Construcción (MEMAC) realizada. Se analiza la importancia del vínculo existente entre consumo de energía y emisiones de CO₂, y se identifica un factor de relación entre ambos (Grado de Emisión Energética de CO₂). Se analiza el concepto de capacidad de carga y su relación con el de sustentabilidad, a la vez que se determina un factor (Capacidad de Carga Óptima de CO₂) que permite identificar los límites máximo y óptimo de emisión de CO₂ a la atmósfera, calculándose finalmente este factor para México.

El capítulo tres, describe las etapas que componen la MEMAC configurada, sus características principales, algunas consideraciones para su aplicación a los materiales de construcción y la secuencia del procedimiento a seguir.

En el capítulo cuatro, se determina el nivel de sustentabilidad del Acero como ejemplo de aplicación y validación de la MEMAC. Se siguen para esto, las cuatro etapas principales de la metodología: Objetivo y alcance, Análisis del Inventario, Evaluación e Interpretación de resultados.

Se concluye el documento, con un resumen de contribuciones, reflexiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 1. LA ENERGÍA INCORPORADA EN LA EDIFICACIÓN

Por medio de la exposición y del análisis crítico de los antecedentes metodológicos y de trabajos de investigación realizados, se justifica en el presente capítulo la viabilidad y pertinencia de la Metodología de Evaluación de Materiales de Construcción (MEMAC) a desarrollar, ya comentada en la introducción del presente documento.

1.1. Antecedentes

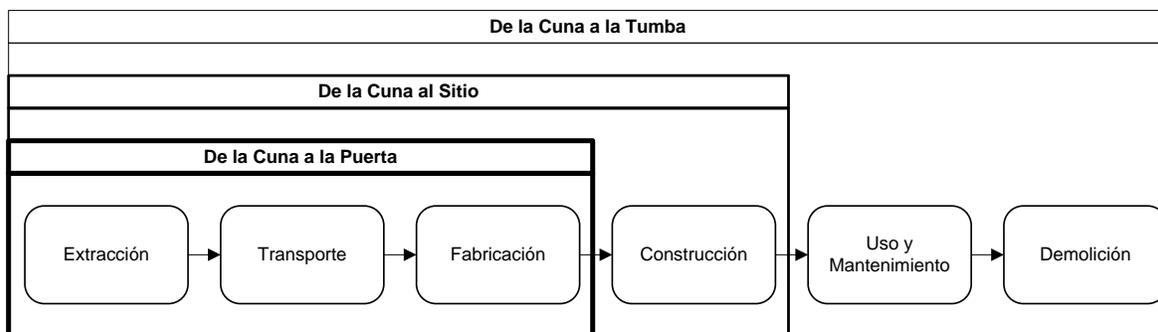
El análisis de la energía incorporada como herramienta de cálculo, se ocupa de medir y registrar la cantidad de energía que se consume en las diferentes etapas de fabricación de un producto. También es conocida como “contenido energético”. Dentro de las herramientas metodológicas actuales para la evaluación de la energía incorporada y emisiones de CO₂, existen en el mundo particularmente dos que se han aplicado con éxito en la edificación, éstas son: el *análisis de energía incorporada* y la metodología del *Análisis del Ciclo de Vida (ACV)*. En este apartado se describen las características, beneficios y limitaciones de cada una de ellas.

1.1.1. El análisis de energía incorporada

Esta herramienta metodológica suele utilizarse para poner en evidencia los altos costos energéticos que entrañan los materiales de construcción, desde la Extracción, hasta la etapa de Construcción, esto lo confirma Vázquez (2001, Enero) en su definición de energía incorporada: *“la energía incorporada de un material incluye toda la que se necesitó en los distintos procesos necesarios para llevar el material a su lugar en el edificio. Debe incluir la energía asociada al transporte (y a la parte proporcional de la infraestructura necesaria para que éste sea posible), así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarios para todos esos procesos”*.

Sin embargo, los alcances del análisis de *energía incorporada* suelen ser muy variados, por lo que no existe consenso aún sobre un criterio específico (Figura 3). Otros autores como Edwards (2005), van más allá de la etapa de construcción, considerando también el uso, mantenimiento y demolición del material (de la cuna a la tumba). El *Sustainable Energy Research Team* (SERT) de la University of BATH del Reino Unido, considera que la *energía incorporada* debe comprender el Proceso de producción del material: extracción, transporte y fabricación (visión “*de la cuna a la puerta*”). En el presente documento, al referirnos al concepto de *energía incorporada* de los materiales de construcción, lo haremos en términos de la definición del SERT, (“*de la cuna a la puerta*”).

Figura 3. Etapas del ciclo de vida de materiales de construcción y diferentes enfoques del concepto de energía incorporada.



Existen tres métodos principales para realizar un análisis de energía incorporada, los cuales se describen a continuación.

1.1.1.1. Método de análisis del proceso

Comprende las tareas de identificación de las entradas y salidas de un sistema y las tareas de asignación de valores de energía a los flujos de los productos (Crawford, 2005), incluyendo la energía directa de los procesos de manufactura y la indirecta de los materiales de entrada de los procesos. Según (IFIAS, 1974, citado por Treloar, 1998: 5), su metodología consta de cuatro pasos principales:

- 1) Medición de los requerimientos directos de energía del proceso.
- 2) Medición de las salidas de los procesos.
- 3) Cuantificación de los productos requeridos directamente en el proceso.
- 4) Aplicación de los pasos 1 a 3 de cada producto obtenido en el paso 3.

Es un método flexible que se adapta a la cantidad y tipo de información con que se cuenta, sin embargo, de acuerdo con Crawford (2005), muchas entradas importantes y, sobre todo, procesos, suelen quedar fuera del estudio, considerándosele por esta razón un método incompleto. Esta flexibilidad en los criterios de análisis no permite que se cuente con un sistema estandarizado de análisis, por lo que la comparación de un producto con otro no es posible realizarla en igualdad de condiciones. Según Treloar (1998: 11), la principal limitación es que, por su complejidad en el manejo de la información, los detalles del análisis son incapaces de ser reportados de manera suficiente y adecuada.

1.1.1.2. Método de análisis de entradas y salidas (input-output)

Estos métodos hacen uso de tablas para relacionar datos de entrada y salida de la economía, con cantidades físicas de energía y cantidades de productos. Se basan en estadísticas de promedios nacionales de flujos financieros entre sectores de la economía, para determinar cantidades de energía usada por una unidad de valor determinada (intensidad energética). De acuerdo con Miller y Peter (1985) citado por Seo (2001), la intensidad de la energía incorporada, puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$E_m = E_{in}(I - A)^{-1}.$$

Donde:

- E_m = vector de intensidad de energía incorporada;
- E_{in} = vector de entrada de energía;
- I = unidad matricial;
- A = tabla de entrada y salida.

Al utilizar información estadística nacional, este método elimina el trabajo de campo, por lo que comparativamente con el método anterior es significativamente más rápido. Sin embargo, de acuerdo con Treloar (1998), los análisis de entradas y salidas presentan cuatro problemas:

- *Suposiciones de proporcionalidad:* se considera que la cantidad de bienes y servicios requeridos por un sector es directamente proporcional al costo de cada uno de los productos del sector.
- *Suposiciones de homogeneidad:* considera que los diferentes productos que se agrupan bajo una misma clasificación tienen los mismos requerimientos de entradas y salidas.
- *El uso de datos económicos* para simular la energía incorporada de productos individuales, requiere una conversión de flujos de producto de unidad monetaria a unidades físicas, ya que no se cuenta con suficiente desagregación. El promedio de precios nacionales no siempre es representativo del precio real de un producto, porque no considera las compras al por mayor, donde se consiguen precios diferentes, ni el costo de equipo.
- *Puede ocurrir conteo doble de energía* con uso de matrices para el cálculo. De acuerdo con Crawford (2005), por los errores a que es sujeto, este método es considerado inferior a aquellos que han sido desarrollados con relación al análisis directo de la energía incorporada.

1.1.1.3. Métodos de análisis híbridos

Combinan los métodos de análisis del proceso y el análisis de entradas y salidas, con el objetivo de reducir los errores inherentes a ambos métodos. Los hay de dos tipos:

1. Análisis de procesos híbridos. Consideran que el error en el modelo de entrada y salida del sector que produce un particular producto, puede ser reducido al determinar las cantidades de entradas de bienes y servicios dentro del proceso principal. La intensidad total de energía de materiales básicos es trasladada dentro de unidades físicas de manera promediada.

Los errores originados por el uso de los precios de productos pueden ser menos significativos que los errores atribuidos a los datos aislados del análisis de entrada y salida, Sin embargo, de acuerdo con Treloar (1998), al igual que el método de análisis del proceso, suelen seguir quedando fuera del estudio entradas y procesos.

2. Análisis de entradas y salidas híbridos. Usan los datos obtenidos en un tradicional método de análisis de proceso (Crawford, 2005). Estos métodos pueden ser clasificados dentro de tres grupos: a) aquellos que sustituyen los datos del análisis del proceso dentro del modelo de entrada y salida; b) aquellos que adicionan una columna para el modelo de entrada y salida de los datos del análisis del proceso; c) los que modifican los rumbos de la energía directa con datos del análisis del proceso (Treloar, 1998).

Según Treloar, (1998), la sustitución de datos del análisis del proceso puede producir menos credibilidad que otro proceso de análisis o que el análisis de entrada y salida solo, por indeseables efectos indirectos, ya que pueden afectar a la homogeneidad y proporcionalidad de los datos. Además, cuando se incluye una columna en el modelo de entrada y salida con los datos del análisis del proceso, la cantidad de tiempo que se gasta para considerar pequeñas entradas es demasiado, mientras que otros importantes flujos pueden no ser investigados con tanto detalle.

1.1.2. El Análisis del Ciclo de Vida

Entre los instrumentos de gestión ambiental se encuentra el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). La gestión ambiental, como dice Gómez Orea (1998), “consiste en conducir y manejar el sistema ambiental en relación con los elementos y procesos que lo conforman y las actividades que lo afectan” y está orientada a prevenir degradaciones, a corregir actuaciones degradantes, a aplicar medidas curativas (recuperar, restaurar, reformar, rehabilitar), a mejorar situaciones aunque no puedan considerarse degradadas, entre otras. La gestión ambiental, continúa Gómez Orea, afecta a las actividades que ocasionan un deterioro en las condiciones generales del medio –en un ecosistema, por ejemplo--; a los elementos y factores ambientales que reciben el efecto y; las relaciones que entre causas y efectos se establecen.

El Análisis del Ciclo de Vida, por sus características y objetivos, estaría dentro de los instrumentos de carácter preventivo de gestión ambiental. Su análisis inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente. La idea de este método, es que un producto no sólo impacta al ambiente durante su etapa de uso, sino también, cuando se fabrica y cuando se desecha.

El ACV intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. La Organización Internacional para la Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), es el organismo que ha desarrollado una serie de normas enfocadas a la Administración o Gestión Ambiental. Éstas incluyen las series ISO-14040 sobre el ACV, que son de carácter voluntario.

1.1.2.1. Origen y evolución del ACV

El primer ACV fue realizado en 1969 por el *Midwest Research Institute* (MRI) para la empresa Coca-Cola (Romero, 2003), donde la premisa fundamental fue disminuir el consumo de recursos, y por lo tanto, la cantidad de emisiones al ambiente. Esta institución junto con grupos como *Franklin Associates Ltd.*, realizaron más de 60 análisis durante los años de 1970 con el mismo objetivo, usando métodos de balance de entradas/salidas e incorporando cálculos de energía.

En Europa, estudios similares se realizaron en el decenio de 1960 por parte de la Gran Bretaña. Pero fue a partir de los años de 1980 cuando la aplicación del ACV se incrementó. En esos mismos años se desarrollaron dos cambios importantes: primero, en los métodos para cuantificar el impacto del producto en distintas categorías de problemas ambientales (tal como el calentamiento global y agotamiento de los recursos); y segundo, en la disponibilidad para uso público de los estudios de ACV.

En 1993 la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), formuló el primer código internacional: Código de prácticas para el ACV, con el fin de homogeneizar los diversos estudios realizados para que siguieran una misma metodología (Romero, 2003). Esto impulsó el inicio de desarrollos masivos de ACV en diversas áreas de interés mundial, pues se realizaron conferencias, talleres y políticas sobre ACV. Posteriormente, la ISO apoyó este desarrollo sentando las bases metodológicas, conceptos y procedimientos, estandarizando los criterios (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2001). Luego, en mayo de 1997, el grupo 5 del comité técnico ISO/TC 207 diseñó la norma ISO 14040, la cual fue aprobada por 60 países (Suppen, 2005b).

En 2002 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se unió a la labor de la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC, por sus siglas en inglés) para lanzar la iniciativa del Ciclo de Vida, creando una alianza internacional para poner en práctica el concepto del ciclo de vida. Después de treinta años el ACV ha tenido un avance impresionante, sin embargo, se reconoce que la técnica está en una etapa temprana de su desarrollo¹⁵.

En México, de acuerdo con Suppen (2005b), el inicio del ACV es reciente, el Centro Mexicano de Producción más Limpia (CMPL), realizó algunas iniciativas de formación en ACV en el 2002. En el mismo año, la Secretaría de Economía en su publicación *“100 mejoras tecnológicas inmediatas para pequeña y mediana empresa”* incluyó la importancia del ACV para la industria en México. En 2001 se creó un subcomité nacional para revisar la metodología de la ISO 14040 y adaptarla al caso mexicano; se realizaron estudios académicos relacionados con el ACV, e inician aplicaciones en industria y gobierno del ACV. En 2008 finalmente, el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (IMNC) publicó la norma mexicana NMX-SAA-14040-IMNC-2008 *“Gestión ambiental, Análisis de ciclo de vida, Principios y marco de referencia”*, y la norma NMX-SAA-14044-IMNC-2008 *“Gestión ambiental, Análisis del ciclo de vida, Requisitos y directrices”*.

1.1.2.2. Metodología del ACV

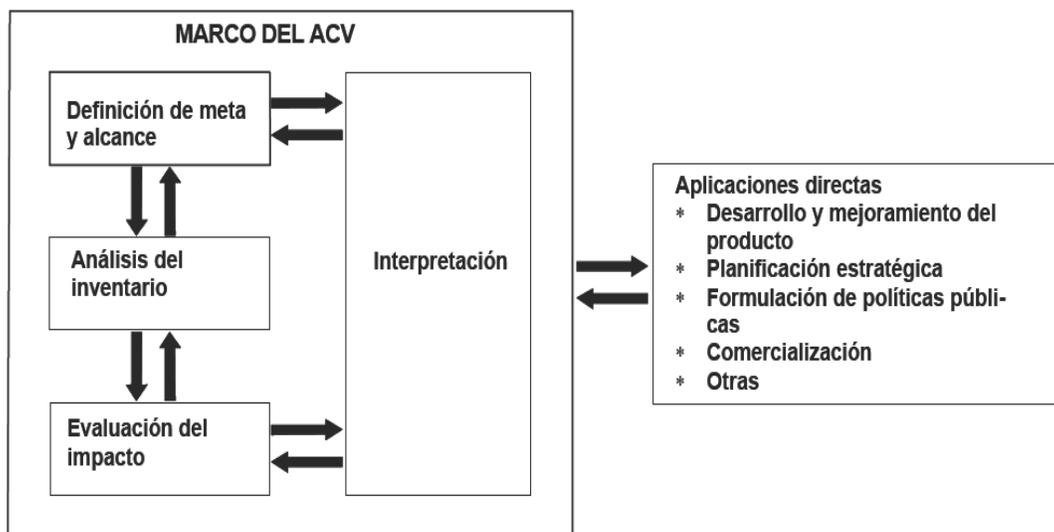
La norma NMX-SAA-14040-IMNC-2008 establece que *“el ACV trata los aspectos ambientales e impactos potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la cuna a la tumba)”*. De acuerdo con la esta, el ACV consta de cuatro fases: 1) Definición de los objetivos y el alcance, 2) Análisis del inventario, 3) Evaluación del impacto y 4) Interpretación de resultados.

¹⁵ La norma ISO (IRAM-ISO-14040, 1998) reconoce que algunas fases de la técnica del ACV, tal como la evaluación del impacto, están aún en sus comienzos. Se debe trabajar mucho y recoger experiencia práctica para un mayor desarrollo del nivel práctico del ACV.

Las fases activas o dinámicas, en las que se recopilan y evalúan los datos, son la segunda y la tercera. Las fases primera y cuarta pueden considerarse como fases estáticas. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse los planteamientos de la fase anterior y reconducirla hacia el camino que ofrezca el nuevo conocimiento adquirido. El ACV es, por lo tanto, un proceso que se retroalimenta y se enriquece a medida que se realiza.

En la norma NMX-SAA-14040-IMNC-2008, se establecen los fundamentos de la evaluación del ciclo de vida, es decir, el marco metodológico (ver Figura 4), y se explica brevemente cada una de las fases, la preparación del informe y el proceso de revisión crítica. Mientras que en la NMX-SAA-14044-IMNC-2008 se explican en forma detallada cada una de las fases del ACV.

Figura 4. Etapas de un ACV



Fuente: NMX-SAA-14040-IMNC-2008: 4.2.3.

1. Definición de los objetivos y alcance. Trata de esclarecer sin ambigüedades cuáles son las metas del estudio. Se definen compromisos y responsabilidades para garantizar el empleo ético de los resultados, como también los niveles de accesibilidad de estos resultados.

Al mismo tiempo se establecen límites de carácter temporal y geográfico para el estudio. Comprende la exposición de los motivos por los que se desarrolla el estudio y la descripción del destinatario del mismo. El alcance es la definición de la amplitud, la unidad funcional, profundidad, suposiciones, requisitos de los datos y detalle del estudio. El ACV es una técnica iterativa, por lo que en la medida que se avanza en su aplicación lo anteriormente establecido puede verse modificado.

2. Análisis del inventario. Esta fase consiste en la cuantificación de las entradas y salidas del sistema en estudio, en la que se incluye el uso de recursos (materias primas y energía), las emisiones a la atmósfera, suelo y aguas y la generación de residuos. Los datos obtenidos en esta fase son el punto de partida para la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida. Según la norma NMX-SAA-14044-IMNC-2008 (4.3), es recomendable utilizar datos directamente obtenidos del proceso en estudio, a través de: medidas in situ, balances de materia y energía, entrevistas, fuentes bibliográficas, etc.

El inventario, a fin de dar una visión global del producto/proceso al que corresponde, además de los datos cuantificados debe constar de (4.3.2.2):

- Diagramas de flujo que dejen claro el sistema en estudio, así como las relaciones que tienen lugar dentro del mismo.
- Descripción detallada de cada unidad de proceso, listando la categoría de los datos asociados con cada una de ellas.
- Descripción de una lista donde se especifiquen las unidades de medida de cada parámetro.
- Descripción de los métodos empleados para recoger los datos y de las técnicas de cálculo empleadas para cada categoría de datos.
- Instrucciones informando claramente de fuentes documentales para casos especiales, irregularidades, o cualquier otra circunstancia asociada con la recogida de datos.

3. Evaluación del impacto. Tiene por objeto valorar los resultados del análisis del inventario del producto o servicio en cuestión, cuantificando los posibles impactos medioambientales. Es en donde se resumen y ponderan las capacidades de afectación al medio ambiente, según una serie dada de categorías de impacto. En esta etapa se modelizan los impactos ambientales seleccionados y usa indicadores para explicar y resumir los datos. Prepara además la fase de interpretación del ciclo de vida.

De acuerdo con Suppen (2005b), en la estructura metodológica del ACV existen dos partes fundamentales: *“el inventario de ciclo de vida, en donde se calculan todos los impactos durante el ciclo de vida, y la evaluación de impacto de ciclo de vida (el modelo de asignación), en donde se relacionan los impactos con los problemas ambientales con el fin de obtener un eco-indicador”*.

4. Interpretación de resultados. En esta etapa se resumen y discuten los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida y de la evaluación del impacto, para extraer conclusiones, formular recomendaciones y tomar decisiones. Consiste en la presentación final (generalmente gráfica) de las conclusiones y de las propuestas de mejoras. Los resultados obtenidos deben ser resumidos, estructurados y analizados. El marco metodológico desglosado puede apreciarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Desglose de las etapas del ACV

1. Definición de meta y alcance
1.1. Meta del estudio
1.2. Alcance del estudio
1.2.1. Función y unidad funcional
1.2.2. Límites del sistema
1.2.3. Requisitos de calidad de los datos
1.2.4. Comparaciones entre sistemas
1.2.5. Consideraciones para la revisión crítica
2. Análisis del inventario del ciclo de vida
2.1. Descripción general del inventario del ciclo de vida
2.2. Recolección de datos y procedimientos de cálculo
2.2.1. Validación de los datos
2.2.2. Datos relativos al procedimiento unitario
2.2.3. Datos relativos a la unidad funcional y la agregación de los datos
2.2.4. Refinación de los límites del sistema
2.3. Asignación de flujos y emisiones
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida
3.1 Selección de categorías de impacto
3.2 Clasificación
3.3 Caracterización
3.4 Perfil del EICV
4. Interpretación del ciclo de vida
5. Informe
6. Revisión crítica

Fuente: NMX-SAA-14040-IMNC-2008

1.1.2.3. El ACV en el sector de la edificación

En el caso de un edificio, el ACV se centra en los complejos impactos de extracción de los materiales, de transporte de materias primas, de procesamiento en la fábrica, de transporte al sitio de la obra, erección del edificio, uso y mantenimiento, y finalmente su demolición y eliminación final.

Identifica los flujos de materiales, energía y residuos que genera un edificio durante toda su vida útil, de manera que el impacto ambiental pueda determinarse por adelantado (Edwards, 2005). A diferencia del análisis de energía incorporada, el ACV toma en cuenta el total de los impactos ambientales, no solo la energía utilizada. Capta todos los efectos relevantes de un producto o proceso a lo largo de todo su ciclo de vida.

De acuerdo con Edwards (2005), como herramienta de evaluación, el ACV tiene tres ventajas:

- Introduce la duración en el análisis, tomando en cuenta los diferentes impactos y ciclos de reciclaje según un enfoque global.
- Permite analizar el impacto energético, ecológico y medioambiental desde el punto de vista del beneficio social y económico.
- Constituye una herramienta integral, que tiende puentes entre el diseño, la fabricación, la construcción y el mantenimiento.

Sin embargo, también plantea algunos problemas. El proceso considera individualmente los diferentes materiales y productos de la construcción (acero, hormigón, azulejos, pinturas, etc.) y analiza sistemáticamente el impacto ecológico de cada elemento en el tiempo. Desgraciadamente, la edificación es mucho más compleja y emplea a menudo los materiales de manera simultánea, de forma que las ventajas del ciclo de vida de uno pueden quedar anuladas por las del otro (Edwards, 2005).

De acuerdo con el CMHC (Environmental Framework, 2004), algunas de las razones de la complejidad de la aplicación del ACV en el sector de la edificación son las siguientes:

- La expectativa de vida de un edificio es incierta, causando imprecisión, y los factores clave, como fuentes de energía o eficiencia energética pueden cambiar a lo largo del tiempo, haciendo las predicciones de cargas ambientales inexactas.
- Las edificaciones pertenecen a un sitio específico y muchos impactos son locales. Normalmente no son considerados en el ACV.
- Los edificios, componentes y productos, son heterogéneos en su composición, por eso muchos de los datos asociados a los productos o procesos de manufactura pueden variar grandemente.
- La edificación es multifuncional lo que hace difícil escoger una adecuada unidad funcional.

- En la evaluación del confort y salud humana, la interrelación del ambiente exterior e interior del edificio es alta y conduce a diferentes resultados según el sitio.

El ACV también observa ciertas limitaciones como la subjetividad, las limitaciones de los modelos empleados, o que los resultados de los estudios del ACV enfocados sobre temas globales y regionales pueden no ser apropiados para aplicaciones locales. En el contexto latinoamericano, una de las limitantes más importantes, es que la exactitud de los resultados de los estudios del ACV puede estar limitada por la accesibilidad o disponibilidad de los datos pertinentes, o por la calidad de los datos, por ejemplo, falta de datos, tipos de datos, agregación, promedios, datos específicos de sitios, etc. (Suppen, 2005a). De acuerdo con Arena (2005), el uso del ACV es particularmente indicado en el análisis de energía incorporada e impacto ambiental en general, sin embargo, en el caso del sector de la edificación la estricta aplicación del método del ACV es muy difícil, debido a la complejidad de los procesos, entradas y salidas de las fuentes, y a los impredecibles cambios de uso del espacio y remodelaciones de los edificios.

En algunos países de mayor desarrollo económico se han implementado diversas estrategias para reducir la energía incorporada de la edificación y el impacto ambiental relacionado desde la etapa de diseño. Algunas como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) basado en la norma ISO 14040-44, lo utilizan países como Australia, Alemania, Canadá, Dinamarca, EUA, Finlandia, Francia, Holanda, Japón, Noruega, Países Bajos, Suecia y Suiza. Cuentan estos países también con bases de datos y software para el análisis del impacto en el ambiente de diferentes tipos de edificios.

Algunos programas existentes en el mercado que utilizan el ACV para determinar el impacto de los edificios en el ambiente se pueden ver en la Tabla 3. Una gran cantidad de programas genéricos que utilizan el ACV son aplicados tanto al sector de la edificación como a cualquier otro, tales como el SimaPro holandés, el Boustead de Inglaterra, el LCAiT sueco, etc¹⁶. (Arena, 2005).

Tabla 3. Software para edificación que utiliza el ACV y/o método de energía incorporada en diferentes países.

País	Nombre	Tipo de análisis	Tipo de edificación	Dirección electrónica
Australia	LISA	ACV	Grandes y pequeños	http://www.lisa.org/
Australia	LCAid	Energía incorporada	Oficinas	http://www.projectweb.gov.com.au/dataweb/lcaid/framesetpages/MAIN.HTM
Alemania	GaBi3	ACV	Grandes	http://www.pe-europe.com
Alemania	EcoPro	ACV	Grandes y pequeños	http://www.ecopro.de/
Canadá	ATHENA	ACV, energía incorporada	Grandes y pequeños	http://www.athenaSMI.ca
Dinamarca	BEAT 2000	ACV, energía incorporada	Vivienda individual, pequeñas y grandes	http://www.by-og-byg.dk/english/publishing/software/beat2000/prices.htm
EUA	Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)	ACV, energía incorporada	Viviendas unifamiliares, grandes y pequeños edificios	http://www.bfrl.nist.gov/oe.html
Finlandia	LCA-House	ACV, energía incorporada	Viviendas unifamiliares y unidades residenciales	http://www.vtt.fi/rte/esitteet/ymparisto/lcahouse.html
Francia	TEAM	ACV	Múltiples	http://www.ecobalance.com/gb_index.html
Francia	Equer	ACV	Grandes y pequeños	peuortier@cenerg.ensmp.fr
Holanda	Eco-Quantum	ACV, energía incorporada	Grandes y pequeños	http://www.ecoquantum.nl
Holanda	EcoInstall	ACV	Grandes y pequeños	http://www.isso.nl
Japón	BRI LCA	ACV, energía incorporada	Viviendas unifamiliares y unidades residenciales, oficinas	http://www.kenken.go.jp/english/index.html
Noruega	EkoProfile	Energía incorporada	Grandes y pequeños, multiresidenciales, oficinas	http://www.norgit.no/projects/okoprofil/
Países bajos	EcoIndicator	Energía incorporada	Grandes y pequeños	http://www.pre.nl/eco-indicator99
Reino Unido	Environmental Profiles	ACV	Viviendas unifamiliares, grandes y pequeños edificios	http://collaborate.bre.co.uk/envprofiles/
Reino Unido	Envest	Energía incorporada	Grandes y pequeños, oficinas	http://www.envestventures.com/
Suecia	LCAiT	ACV, energía incorporada	Grandes y pequeños	http://www.lcait.com/
Suiza	EcoEffect	Energía incorporada	Grandes y pequeños	http://ecoeffect.net/ecoeffect_sp.html

¹⁶ Para una descripción de estos y otros programas, se puede consultar el directorio de herramientas de ACV publicado por Annex 31 de la International Energy Agency (IEA).
<http://www.greenbuilding.ca/annex31/>

1.1.3. Trabajos de investigación realizados

La Metodología de Evaluación de Materiales de Construcción (MEMAC) pretendida ya comentada en el capítulo anterior, toma en consideración la energía incorporada y las emisiones de CO₂ de los materiales de construcción, y su relación con la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra para la determinación del nivel de sustentabilidad. Por lo anterior, con el objeto de observar la manera en que ha sido tratado el problema por otros autores, se realiza el análisis de algunas investigaciones que utilizan métodos de análisis del proceso, tablas de entrada y salida o el ACV en el análisis de la energía incorporada y emisiones de CO₂ en el análisis de la edificación. Así mismo, se trata de identificar en ellas, la consideración de la capacidad de carga de los sumideros de carbono como categoría de impacto para la evaluación de los datos y la medición del nivel de sustentabilidad.

S. Tucker *et al* (1998), desarrollaron en Australia, un sistema llamado APDesign, para estimar la energía usada en la construcción de edificios y las emisiones de CO₂ relacionadas en el momento del diseño, utilizando la plataforma CAD y dibujos en 3D. El software calcula cantidades de materiales, de energía y de CO₂ por material utilizado, grupo de materiales o elemento constructivo. Para el cálculo de energía y emisiones de CO₂ de los materiales de construcción el programa utiliza tablas de entrada y salida (input-output tables) y otros estudios nacionales e internacionales no especificados.

M. Suzuki, y T. Oka (1998), desarrollaron un método para cuantificar la cantidad de energía y emisiones de CO₂ en el ciclo de vida de edificios de oficinas en Japón. Fueron usadas las tablas de entradas y salidas (input-output tables) para calcular el total de energía consumida y emisiones de CO₂, las cuales se basan en los precios del productor. En la etapa de construcción, identificaron los costos de materiales y mano de obra de cada tarea, los cuales fueron estimados usando el *Handbook of construction costs*.

Obtuvieron el precio unitario de todos los materiales para finalmente obtener los costos para el productor para cada material y lo introdujeron en una ecuación. La cantidad de emisiones de CO₂ fueron estimadas por medio del cálculo del consumo de combustibles fósiles.

Stevan Blanchard y Peter Reppe (1998), analizaron una residencia en Michigan, EUA, con el objeto de determinar la energía consumida, el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) y los costos durante todo el ciclo de vida. Compararon estos con los que se obtenían al sustituir materiales que tenían una baja energía incorporada en su proceso de fabricación. Utilizaron métodos estándar de evaluación del ciclo de vida, que fueron trabajos que antecedieron a los del ACV desarrollados por la Organización Internacional para la Normalización (ISO).

N. Conway (1999), hace uso del ACV y de tablas de entrada y salida para el análisis de un caso comparativo entre pavimento de asfalto y de concreto reforzado en EUA. Su objetivo fue mostrar la aplicación de la metodología a un caso específico de estudio.

La *Building Information Foundation* RTS (2000), realizó en Finlandia, un modelo para la elaboración de declaraciones ambientales de productos de la construcción. Provee información para la evaluación de los impactos ambientales de los productos de la construcción a todo lo largo de su ciclo de vida. Se basa en el esquema del ACV, evaluando las siguientes categorías de impacto: gases tóxicos, presencia de partículas peligrosas o gases en el aire, emisión peligrosa de radiación, contaminación del agua y de la tierra, eliminación de desechos y presencia de humedad.

Seongwon Seo y Yongwoo Hwang (2001), clasificaron y cuantificaron las emisiones de CO₂ en el ciclo de vida de varios tipos de residencias construidas en Corea, con el propósito de obtener información básica para el ecodiseño de edificios. En este estudio, se utilizó la metodología del ACV y consideraron sólo emisiones de origen fósil y de la producción de cemento.

Consideraron como unidad funcional de análisis, 10 m² de área construida. Para calcular las emisiones de CO₂ en la etapa de construcción de materiales, utilizaron el método de energía incorporada de tablas de entrada y salida.

W. Trusty y J. Meil (2002), realizaron la evaluación de tres alternativas de diseño de una residencia unifamiliar en EUA. El análisis se llevó a cabo utilizando el software, procedimientos y base de datos desarrollados por Athena, los cuales se basan en el ACV, evaluando las siguientes categorías de impacto: la energía incorporada, el potencial de calentamiento global (GWP), la toxicidad del aire, toxicidad del agua, el uso de los recursos y los desechos sólidos.

Elisa Cobas (2002), desarrolló en México, un análisis comparativo de materiales de concreto, asfalto y nuevos materiales alternativos como el “calyeso”, para la construcción de caminos. Utilizó el ACV para el análisis e incluyó las etapas de extracción, fabricación, construcción y mantenimiento del camino, considerando los gases de efecto invernadero como emisiones al aire. Utilizó el software SimaPro para la realización de los cálculos y datos de EUA en la definición de consumos y factores de emisión de gases.

El *International Aluminum Institute* (2003), Realizó en EUA, un detallado inventario de datos de la producción de aluminio durante todo el ciclo de vida, aplicando el Análisis del Ciclo de Vida.

Robert Crawford y Graham Treloar (2005), evaluaron la energía incorporada y el agua utilizada en un edificio comercial en Australia, usando el método de análisis híbrido basado en análisis de entradas y salidas. Encontraron que el uso de éste método, comparado con los tradicionales de análisis del proceso y tablas de entradas y salidas, incrementa la validez y credibilidad de la información obtenida.

S. Juannila *et al* (2006), realizaron análisis de energía y emisiones relacionadas en edificios de oficinas en Europa y Estados Unidos a lo largo de su ciclo de vida, utilizando la metodología del ACV.

Bill Randolph *et al* (2007), realizan un análisis de energía incorporada y consumo de agua en 12 residencias seleccionadas en Sydney con baja y alta densidad de construcción. Para la recolección de datos desarrollaron una metodología, la cual les permitió monitorear el consumo de los factores mencionados en los desarrollos habitacionales.

El Centro Mario Molina (2008), realizó un estudio de la producción del cemento en México, basado en las sugerencias del Center for Clean Air Policy, para encontrar posibles soluciones de mitigación de emisiones de CO₂ para varios escenarios planteados. En la estimación de las emisiones de CO₂ utilizaron la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC), la cual establece factores de emisión de CO₂ basados en la quema de combustibles fósiles.

O. Kofoworola y S. Gheewala (2008), utilizaron una combinación de métodos de entrada y salida y de análisis del proceso, dentro de una estructura de Análisis de Ciclo de Vida, en la evaluación del impacto ambiental de oficinas en Tailandia. El estudio abarca la totalidad del ciclo de vida de la edificación, en el que se evaluaron las siguientes categorías de impacto: el potencial de calentamiento global (GWP), la acidificación y la foto-oxidación.

1.2. Análisis crítico de antecedentes

Con relación a las metodologías existentes descritas en el apartado de antecedentes del presente capítulo, se pudo observar, que las metodologías de Análisis de Energía Incorporada de manera general, presentan dos desventajas principales, que las descartan para los fines pretendidos en la presente investigación, ya señalados en la introducción de este documento:

- No cuentan con un procedimiento estandarizado de análisis, como lo reconoce Vázquez (2001), por lo que la comparación de resultados entre productos puede darse bajo supuestos diferentes.

- No contemplan la etapa de evaluación como parte de su metodología, sólo llegan a estimar el total de energía y de CO₂ a largo de los procesos considerados.

La metodología del ACV, en cambio, presenta las siguientes ventajas:

- Cuenta con una estructura metodológica sólida respaldada por las normas ISO, en la que se contempla una etapa de evaluación y otra de interpretación de resultados.
- La metodología del ACV, es una herramienta científica que considera el ciclo de vida completo de un producto y la totalidad de impactos potenciales; es un método flexible en su aplicación al depender de la definición que se haga del objetivo y el alcance.
- La norma NMX-SAA-14040-IMNC-2008 (4.3) reconoce que no hay un método único para realizar un ACV, por lo que se tiene flexibilidad para implementar una metodología de acuerdo con los objetivos que se pretendan.

Con relación a trabajos de investigación realizados, se puede observar en el apartado anterior, que el análisis de energía incorporada y emisiones de CO₂ en la edificación se ha realizado aplicando metodologías ya existentes: N. Conway (1999), utilizó métodos de análisis de entradas y salidas (input – output table); Robert Crawford y Graham Treloar (2005), utilizaron métodos híbridos; El Centro Mario Molina (2008), identificó flujos de materiales y energía en el ciclo de vida de un sistema, por lo que su procedimiento se puede catalogar como análisis del proceso; W. Trusty y J. Meil (2002), Elisa Cobas (2002), El *International Aluminum Institute* (2003) y S. Juannila *et al* (2006), usaron la metodología del ACV; Steven Blanchard y Peter Reppe (1998) usaron métodos de evaluación del ciclo de vida que antecedieron al ACV; Seongwon Seo y Yongwoo Hwang (2001), usaron la metodología del ACV junto con las tablas de entrada y salida, mientras que O. Kofoworola y S. Gheewala (2008), utilizaron el ACV, las tablas de entrada y salida y el método de análisis del proceso.

Algunos otros crearon su propia metodología, utilizando o adaptando las ya existentes, tal es el caso de: S. Tucker *et al* (1998), M. Suzuki y T. Oka (1998) y Bill Randolph *et al* (2007), quienes hicieron uso de las tablas de entrada y salida para la obtención de los datos, mientras que la *Building Information Foundation* RTS (2000), hizo uso del ACV para desarrollar su propuesta metodológica.

Todas las investigaciones analizadas contabilizan la energía incorporada durante el ciclo de vida de materiales de construcción, y estiman la cantidad de emisiones arrojadas a la atmósfera, entre otros aspectos, sin embargo, no todas ellas evalúan el impacto de éstas en el ambiente. Sólo cuatro de ellas evalúan las emisiones emitidas a la atmósfera dentro de la categoría de impacto llamada Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés): Steven Blanchard y Peter Reppe (1998), la *Building Information Foundation* RTS (2000), W. Trusty y J. Meil (2002) y O. Kofoworola y S. Gheewala (2008). Dos investigaciones evalúan el consumo de agua como parte de la categoría de impacto de agotamiento de los recursos: Robert Crawford y Graham Treloar (2005) y Bill Randolph *et al* (2007).

La *Building Information Foundation* RTS (2000), además de evaluar el GWP, considera la emisión de gases tóxicos, la emisión peligrosa de radiación, la contaminación del agua y de la tierra, la eliminación de desechos y la presencia de humedad. W. Trusty y J. Meil (2002), también incluyen en la evaluación, además del GWP, la toxicidad del agua, el uso de los recursos y la emisión de desechos sólidos. O. Kofoworola y S. Gheewala (2008), agregan a la evaluación del GWP, la evaluación de la acidificación y la foto-oxidación. Se puede observar, por lo tanto, que ninguno de los trabajos de investigación analizados considera la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra en la evaluación de la energía y emisiones de CO₂ a la atmósfera, ni mucho menos determinan parámetros para medir el nivel de sustentabilidad de materiales de construcción.

Con base en lo analizado, se opta por utilizar como base la normatividad del ACV para desarrollar la Metodología de Evaluación de Materiales de Construcción (MEMAC) pretendida y demostrar la hipótesis ya planteada en el capítulo uno.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En la introducción del presente documento, se habló de la carga ambiental que representa para la atmósfera de la Tierra, el consumo de energía basado en combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ relacionadas. En el presente capítulo, se definen los conceptos básicos de: Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}), Capacidad de Carga en términos de la sustentabilidad, Capacidad de Carga Máxima (CCM) y Capacidad de Carga Óptima de CO₂ (CCO_{CO2}), entre otros, y se calcula este último, con relación a México. Estos conceptos, parten del vínculo tan estrecho existente entre consumo de energía y emisiones de CO₂, y son el fundamento de la Metodología de Evaluación de Materiales (MEMAC).

2.1. Grado de contaminación energética de CO₂

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

Desde el punto de vista de emisiones de CO₂, los combustibles fósiles¹⁷ son recursos no renovables que producen energía no limpia o contaminante, mientras que la energía nuclear es un recurso no renovable también, pero limpio. Las energías renovables son limpias excepto la biomasa que emite CO₂ a la atmósfera al quemarse.

¹⁷ Se consideran combustibles fósiles al carbón, al petróleo y al gas natural. Son mezclas de compuestos orgánicos que se extraen del subsuelo para producir energía por combustión.

Las diferencias en el consumo de energía total entre los diferentes países del mundo son muy grandes, así como también la proporción de la participación de cada tipo de energía. De acuerdo con las estadísticas de energía 2008 de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2008), en el 2006, el promedio por persona (cápita) de consumo de energía de Canadá fue de 8.27 toe/cápita, el de México: 1.69 toe/cápita; mientras Perú consumió 0.49 toe por persona. Países como Francia y Dinamarca, son altos consumidores de energía (Francia: 4.31 toe/cápita; Dinamarca: 3.85 toe/cápita, cuando el promedio en el mundo es de 1.8 toe/cápita).

Sin embargo, a pesar de tener Francia un consumo de energía por persona más alto que Dinamarca, el 79.1% del consumo de electricidad en ese país tiene origen nuclear (energía limpia en cuanto emisiones de CO₂), por lo que el promedio de participación de sus emisiones de CO₂ con respecto a Dinamarca, es mucho menor (Francia: 5.97 tCO₂/cápita; Dinamarca: 10.15 tCO₂/cápita).

Lo anterior indica, que hacia el interior del consumo de energía total de los diferentes países, puede haber diferencias sustanciales en la participación de los diferentes tipos de energía que se utiliza (procedente de combustibles fósiles, renovable (limpias), nuclear y procedente de la biomasa), las cuales condicionan la cantidad de CO₂ que emite un país determinado. De acuerdo con lo anterior, podemos relacionar consumo de energía y emisiones de CO₂ de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 1. } CO_{2T} / CET$$

Donde:

- CO_{2T} : Emisiones de CO₂ totales.
- CET : Consumo de energía total (consumo nacional de energía).

A su vez, el consumo de energía total se compone de:

$$\text{Ecuación 2. } CET = (E_F + E_R + E_N + E_B)$$

Donde:

- E_F: Consumo de energía que procede de combustibles fósiles.
- E_R: Consumo de energía que procede de fuentes renovables limpias.
- E_N: Consumo de energía nuclear.
- E_B: Consumo de energía que procede de la biomasa.

Finalmente, la relación de las emisiones de CO₂ totales y el consumo de energía total se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 3. } CO_{2T} / (E_F + E_R + E_N + E_B)$$

Esta ecuación permite conocer la cantidad de CO₂ total que se emite por unidad de energía consumida total.

Como vimos en el capítulo uno, las emisiones que proceden de los combustibles fósiles son las más importantes en los inventarios de gases GEI, y dentro de éstos por su contribución, las emisiones de CO₂. Basados en la Ecuación 1, podemos relacionar exclusivamente las emisiones de CO₂ de origen fósil con el consumo energético total, lo que permitirá conocer la cantidad de CO₂ de origen fósil que se utiliza por unidad de energía consumida total:

$$\text{Ecuación 4: } CO_{2F} / CET$$

Donde:

- CO_{2F} : Emisiones de CO₂ de origen fósil
- CET : Consumo de energía total (consumo de energía primaria)

Esta relación es un indicador que se conoce como *“intensidad de carbono del consumo energético”*, el cual es utilizado por la Agencia Internacional de Energía (IEA) entre otros organismos. Cuando se utilizan solamente las emisiones de CO₂ en vez de las emisiones de GEI totales, el indicador suele llamarse *“intensidad de CO₂ del consumo energético”*. En este sentido, la ecuación 4 considera también exclusivamente el CO₂, sin embargo, se enfoca al CO₂ de origen fósil.

El valor resultante de la ecuación 4, posibilita establecer un parámetro de comparación entre diversas situaciones bajo una misma base: la relación entre la cantidad de emisiones de CO₂ de origen fósil y el consumo energético total. Por lo tanto, permite determinar desviaciones y estados deseables hacia los que se deban orientar las acciones.

Sea cual sea la composición del consumo energético total en cuanto a tipos y proporción de energía (recordemos que CET es igual a $E_F + E_R + E_N + E_B$), el indicador señalará el grado de emisión con relación al CO₂ de origen fósil, por lo que la ecuación 4 puede ser llamada así “Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO_2})”. Valores altos o bajos señalarán una cantidad alta o baja de CO₂ de origen fósil utilizado por unidad de energía.

En este sentido, mezclas de consumos de energía con predominio de combustibles fósiles, tendrán un GEE_{CO_2} mayor que mezclas que equilibren su consumo con energías limpias (energía renovable y energía nuclear). Países como Francia reducen el GEE_{CO_2} al utilizar en su consumo energía nuclear, la cual en cuanto a emisiones de CO₂ se considera limpia, mientras que México basa su consumo energético en los combustibles fósiles. (Tabla 4). Estados Unidos tiene un GEE_{CO_2} alto, al superar el promedio mundial.

Tabla 4. Intensidad de CO₂ del consumo energético de algunos países

País/región	Intensidad de CO₂ del consumo energético en tCO₂/toe (CO_{2F} / CET)
Mundo	2.39
Canadá	2.00
Dinamarca	2.64
Francia	1.38
México	2.35
Perú	2.06
Estados Unidos	2.45

Nota: tCO₂ = toneladas de dióxido de carbono; toe = toneladas de petróleo equivalente. Fuente de los datos: Key World Energy Statistics 2008 (IEA, 2008).

2.2. Capacidad de carga y sustentabilidad

A lo largo del tiempo, el término “*capacidad de carga*” ha sido utilizado por las diferentes áreas del conocimiento, originando con ello diversas definiciones. Sin embargo, es común encontrar relacionados en estas, dos conceptos muy importantes: *población y recursos naturales*, entendido último en un sentido dinámico¹⁸.

Según el *Population Information Program* (1997), la cuestión de la *capacidad de carga* se ha venido debatiendo desde 1798, cuando el economista inglés Thomas Malthus publicó su *Ensayo sobre el principio de la población y sus efectos en el futuro mejoramiento de la sociedad*, donde expresó que, “*puesto que las tierras productivas y el agua potable son recursos limitados, el crecimiento de la población sobrepasará inevitablemente en algún momento el suministro de alimentos y agua, y sobrevendrá la inanición en masa y la anarquía*” (PIP, 1997). De acuerdo con Manuel Ludevid (Ludevid, 1998), y siguiendo el pensamiento Malthusiano, dentro de una forma clásica de relación entre población y recursos (llamada también teoría biológica o modelo básico), *son los recursos los que determinan la población*¹⁹. Según Ludevid (1998), este modelo concibe al hombre como esencialmente inerte, respondiendo a los cambios pero sin capacidad alguna de iniciativa. Supone además a su juicio, “*que todos los factores que no son población y recursos permanecen constantes, lo que obviamente no es el caso*”. En el enfoque básico de Malthus sobre el crecimiento de la población, por ejemplo, no fueron considerados factores tecnológicos ni culturales. Sin embargo, siguiendo al mismo autor, el modelo básico, a pesar de su sencillez y limitaciones permite identificar y comprender la realidad del desarrollo humano en un primer nivel básico de relación.

¹⁸ Según Luis Urtega (1999: 452), el concepto de recurso natural puede tener varios significados: “*Para los conservacionistas más radicales los recursos naturales son algo estático. Un activo fijo que está en la naturaleza y que el hombre puede consumir o conservar... Para otros, los recursos son más bien un fenómeno dinámico: representan el conjunto de oportunidades que, en cada momento histórico, el medio físico brinda a la humanidad*”.

¹⁹ De esta relación se generan los conceptos de: subpoblación, sobrepoblación y población óptima.

Existen otras teorías poblacionales desde las que se ha definido el término capacidad de carga, como las teorías culturales, con Warren Thompson como uno de sus exponentes principales, que hacen énfasis en el impacto del desarrollo cultural y educativo en la limitación de la natalidad; y las teorías económicas como la del economista David Ricardo, basadas en factores demográficos y económicos como el trabajo. Para este autor, el aumento de salario y la disminución de beneficios, conduciría a menos acumulación de capital y al fin del crecimiento económico; traería como consecuencia, un decrecimiento de la población (Rodríguez, 2001).

Cabe mencionar de acuerdo con Echeverría (2008), que ninguno de los esfuerzos ha resultado concluyente, por lo que no existe una definición universal de lo que es capacidad de carga. Sin embargo, la relación recursos/población tiene que ver con el concepto de desarrollo, en el cual, siguiendo con Echeverría, la opinión generalizada reconoce que, sin ser el único factor que interviene en el desarrollo, la presión demográfica y el consumo de recursos asociado representan un factor muy importante.

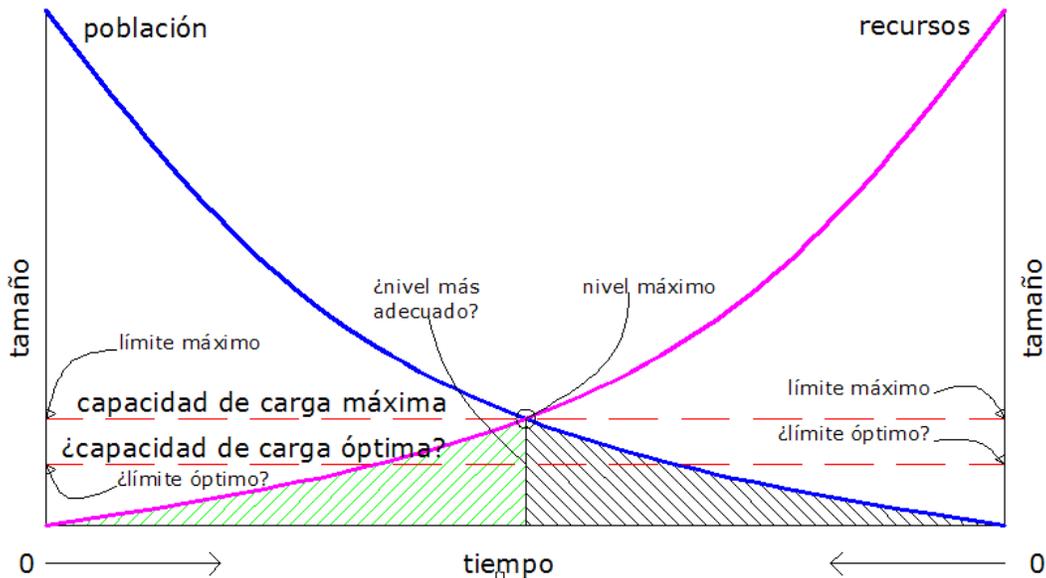
El pensamiento clásico (modelo básico) ha perdurado hasta nuestros días, por lo que es común encontrar definiciones de lo que es *capacidad de carga* basadas en esa teoría. Un ejemplo de esto es la definición comúnmente aceptada que brinda la Comisión Independiente sobre la Población y la Calidad de Vida (CIPCV), la cual dice así: *“la carga máxima que la humanidad puede imponer de modo sostenible al medio ambiente antes de que este sea incapaz de sostener y alimentar la actividad humana”* (CIPCV, 1999). Otras definiciones más recientes también muestran permeado ese pensamiento, tal como lo define el glosario de términos de cambio climático del Instituto Nacional de Ecología (INE, 2008): *“la capacidad de carga se refiere al número de individuos en una población que un hábitat puede mantener”*.

Una definición de *capacidad de carga* relacionada con contaminantes es la que proporciona la SEMARNAT (2008) en sus criterios de evaluación de impacto ambiental. En esta, se sigue visualizando el pensamiento clásico de relación entre población y recursos: “*la capacidad de carga es la medida que posee un componente ambiental (agua, aire, suelo, flora o fauna) para depurar, dispersar, absorber o soportar vertidos, emisiones o residuos sin afectar su calidad, estructura o función*”.

En las anteriores definiciones de capacidad de carga, se advierte la existencia de los siguientes elementos (Gráfica 5):

- Se aprecia la existencia de un tamaño máximo de crecimiento (*límite máximo*) que condiciona la relación población-recursos y que permite equilibrar la balanza entre ambos elemento (*capacidad de carga máxima*).
- Se señala una posible consecuencia si se rebasa este límite.
- Si existe una capacidad de carga máxima (donde se desequilibra el sistema) debe existir entonces una *capacidad de carga óptima*, la cual según Odum y Warrett (2006) es inferior a la capacidad máxima de carga. Esta capacidad de carga óptima puede definirse como el nivel de relación más adecuado en la relación población-recursos, el cual favorece la calidad sobre la cantidad.

Gráfica 5. Concepto de capacidad de carga



De acuerdo con el modelo básico o clásico, la cantidad de recursos condiciona a la población, pudiéndose establecer entonces límites máximos al crecimiento de población (criterios cuantitativos). Este nivel máximo de relación representa lo que comúnmente se denomina capacidad de carga máxima. La capacidad de carga óptima representa el nivel más adecuado en la relación población-recursos la cual se determina de forma cualitativa. La representación independiente de las curvas de población y recursos, permite identificar el punto en el que ambas fuerzas se equilibran. Fuente: Elaboración propia, con base en la figura 4-8 de “Los límites del crecimiento, 30 años después” de Meadows D. et al (2006).

Este concepto de *capacidad de carga óptima* se encuentra directamente relacionado con el de *sustentabilidad*. La definición de “*desarrollo sustentable*” precisada en 1992 en la “Cumbre de la Tierra” celebrada en Río de Janeiro, habla de conciliar tres esferas conceptuales: la económica, la ecológica y la social. Dicho concepto plantea el establecimiento de límites para cada esfera, los cuales son definidos no en términos de crecimiento (cantidad), sino en términos de desarrollo (calidad) por las interrelaciones con las otras esferas, lo que permitiría el equilibrio en el ecosistema. No se puede concebir un crecimiento económico infinito sobre una base finita, como son los recursos de la Tierra.

Se advierte por lo tanto, la existencia de un límite óptimo, la existencia de un desarrollo equitativo de cada esfera, la existencia de una capacidad de carga óptima para el desarrollo humano. Dentro del debate sobre desarrollo sustentable, Gabriella Piccinelli y Pedro Sunyer (Piccinelli, Sunyer, 2008:49) comentan que: *“si se ha admitir alguna definición de desarrollo sostenible nos parece importante que en ella quede comprendido el concepto de límite, por muy vago y cambiante que éste sea”*. En este sentido, Odum y Warrett (2006), han sugerido que *“en lo referente a los asuntos humanos a largo plazo, la sustentabilidad será comprendida de una mejor manera manejándose en los términos del concepto denominado capacidad de carga óptima”*. Podemos decir entonces, que la determinación o establecimiento de un límite óptimo en la relación población-recursos de un ecosistema cualquiera, permite identificar el nivel más adecuado (*capacidad de carga óptima*), el cual se constituye como una puerta que conduce hacia la sustentabilidad.

En una perspectiva de desarrollo sustentable, la determinación de dicho parámetro y su comparación con la realidad, puede facilitar en un principio la identificación y cuantificación de la desviación de las actuales acciones, lo que puede determinar diferentes grados de sustentabilidad. Puede facilitar a su vez, el establecimiento de metas sustentables cuantificables y medibles en torno a población y recursos existentes.

La humanidad enfrenta un reto muy grande, el reto de alcanzar un razonable equilibrio entre consumo de energía y emisiones de CO₂ de origen fósil, y la capacidad de absorción de los sumideros de carbono del planeta. Se enfrenta el reto de avanzar hacia la sustentabilidad, en la cual según vimos, la determinación de la capacidad de carga óptima se presenta como una opción viable de seguir.

2.3. Capacidad de carga óptima de CO₂

Como se observó anteriormente, capacidad de carga óptima y sustentabilidad están relacionadas, y para avanzar hacia ésta, es necesario el establecimiento de un límite óptimo en la relación recursos-población. Según vimos también, dentro del pensamiento clásico, la relación entre población y recursos está determinada por la cantidad de recursos existentes, lo cual permite conocer los límites máximos de crecimiento de población y recursos, y a su vez, permite identificar el nivel máximo de relación (capacidad de carga máxima). En este apartado observaremos, que con relación a la problemática del cambio climático, la cantidad de energía consumida y emisiones de CO₂ de origen fósil relacionadas (población) puede estar determinada por la capacidad de absorción y almacenamiento de los sumideros de la Tierra (recursos).

De acuerdo con los datos del PMC ya vistos aportados por el GCP, actualmente del total de CO₂ que se emite a la atmósfera, el 55% es absorbido y almacenado por los sumideros de carbono del planeta, por lo que se puede establecer este factor de absorción como el límite máximo de emisión de CO₂ (Grado Máximo de Emisión Energética de CO₂). La capacidad de carga máxima por lo tanto, estaría dada entonces por la siguiente ecuación, que combina la Ecuación 4 y el factor de absorción máximo:

$$\text{Ecuación 5. } CCM = (CO_{2F} / CET) * 0.55$$

Donde: CCM = Capacidad de carga máxima; CO_{2F} = Emisiones de CO₂ de origen fósil; CET = Consumo energético total; 0.55 = Capacidad actual de los sumideros de carbono del planeta.

De acuerdo con el IPCC (2007), si la humanidad dejara de emitir CO₂ a la atmósfera por completo, habría una reducción lenta del CO₂ atmosférico de aproximadamente 40 ppm durante el siglo XXI. Cualquier nivel de reducción de emisiones, lo que hace es sólo prolongar el periodo de tiempo en que la acumulación de CO₂ en la atmósfera crezca.

Por lo tanto, con relación al límite óptimo de emisiones de CO₂ a la atmósfera por actividad del hombre, éste tendría que ser *cero emisiones* durante un periodo de tiempo suficiente para reducir las partes por millón de CO₂ actuales en la atmósfera, a niveles que no amenacen la existencia del hombre en la Tierra.

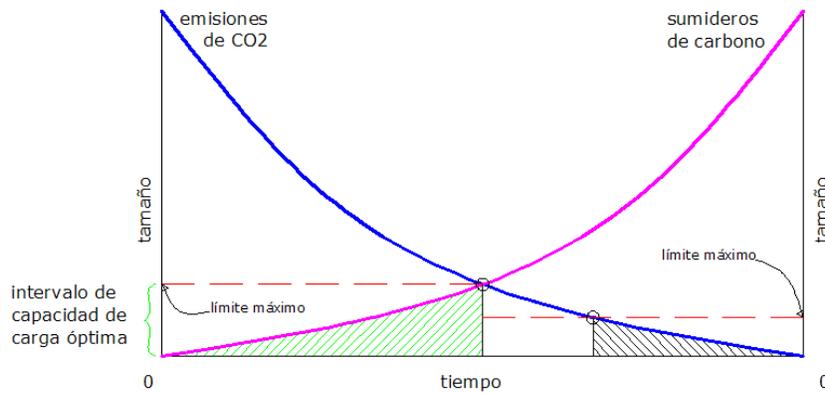
En este sentido, la reducción de consumo de energía y CO₂ que realice el hombre tendrá que ser *cero emisiones* para ser óptima. Sin embargo, el intervalo formado por la capacidad máxima de absorción de los sumideros de carbono (capacidad de carga máxima) y el límite óptimo, puede considerarse también como óptimo desde el punto de vista de eliminación del CO₂ que se emite (ver Gráfica 6). Aunque no se considera la inercia de daño ambiental acumulado en la atmósfera, lo que se emite se absorbe, no representando acumulación de emisiones en la atmósfera, y por lo tanto, no contribuyendo al calentamiento global.

En dicha Gráfica 6 se observan los tres diferentes tipos de relación entre población y recursos. El inciso “a”, presenta una cantidad de emisiones menor que la capacidad de los sumideros. Aunque no se llega al nivel cero emisiones, son absorbidas la totalidad de emisiones y se secuestra también parte de las emisiones existentes en la atmósfera. El inciso “b”, representa una igualdad en la relación población-recursos, existiendo un equilibrio en el sistema, una sustentabilidad cuantitativa. El inciso “c”, se refiere a una cantidad de emisiones mayor que la capacidad de los sumideros, lo que permite identificar el exceso de emisiones y la escasez de recursos.

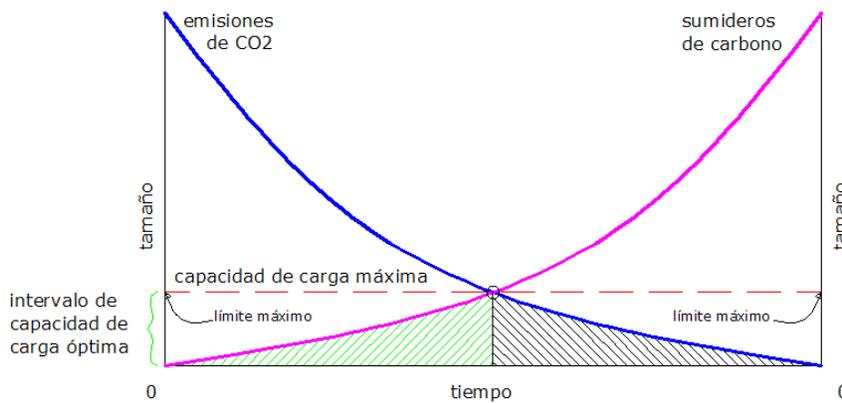
El intervalo de *capacidad de carga óptima de CO₂ (CCO_{CO2})* representa, cualitativamente hablando, el nivel de relación más adecuado entre consumo de energía y emisiones de CO₂ (Grado de Emisión Energética de CO₂), y la capacidad de absorción y almacenamiento de los sumideros de carbono del planeta. Cualquier reducción de emisiones que alcance la igualdad entre emisiones y sumideros, puede considerarse *cuantitativamente sustentable*. Cualquier reducción de emisiones que se encuentre entre la capacidad de carga máxima y el límite óptimo puede considerarse *cualitativamente sustentable*. Entre más cercana la reducción de emisiones a cero, mayor nivel de sustentabilidad.

Gráfica 6. Diferentes tipos de relación entre población y recursos, considerando fijo el tamaño de los recursos.

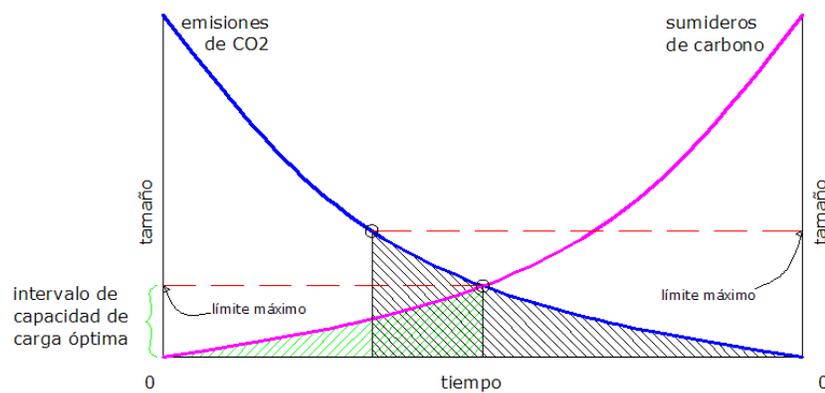
a) emisiones menor que sumideros



b) emisiones igual que sumideros



c) emisiones mayor que sumideros



En todos los casos se observa el intervalo óptimo de capacidad de carga. Cuando las acciones de reducción se encuentran en esta zona, se pueden considerar acciones sustentables cualitativamente. Fuente: Elaboración propia, con base en la figura 4-8 de "Los límites del crecimiento, 30 años después" de Meadows D. et al (2006).

2.3.1. Cálculo para México de la capacidad de carga óptima de CO₂

La contribución al total de emisiones de CO₂ acumuladas en la atmósfera por parte de los diversos países del mundo es muy variable, y está determinada por la cantidad y tipo de energía utilizada (energía de origen fósil, energías limpias, energía nuclear y energía procedente de la biomasa). La magnitud de la reducción de éstas emisiones por parte de cada país tendrá que definirse con base en la contribución particular al problema y su ajuste a lo que permite la capacidad de carga del planeta, ya que no se trata tan solo de minimizar el impacto ambiental que se provoca, sino de no rebasar los límites.

Como ya se comentó en el apartado anterior, la comparación del *Grado de Emisión Energética de CO₂* (GEE_{CO_2}) de una actividad con la *Capacidad de Carga Óptima de CO₂* (CCO_{CO_2}), puede ayudar a identificar el acierto o desacierto en la cantidad de emisión de CO₂ que se emite a la atmósfera respecto de la energía consumida, es decir, el *nivel de sustentabilidad* con que se cuenta. En torno a un diseño más sustentable, lo anterior es muy importante, ya que al conocer el nivel de sustentabilidad de materiales de construcción se estará en mejor posición de seleccionar para la edificación, aquellos que sean más adecuados.

1. El primer paso es calcular la capacidad de carga máxima (CCM) por medio de la Ecuación 5 ya vista:

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

Datos:

- CO_{2F} = 410.6 MtCO₂ (Fuente: CAIT, 2005)
- CET = 7,738.58 PJ (Fuente: Balance Nacional de Energía)

$$CCM = (410.6 \text{ MtCO}_2 / 7,738.58 \text{ PJ}) * 0.55$$

Por lo que la CCM es igual a: 0.02918 MtCO₂/PJ; igual a: 0.02918 kgCO₂/MJ

2. Determinación de la *Capacidad de Carga Óptima de CO₂* (CCO_{CO_2})

Considerando que el límite óptimo es cero emisiones de CO₂, la CCO_{CO_2} está dada por el siguiente intervalo:

$$0 \leq CCO_{CO_2} \leq 0.02918 \text{ kgCO}_2/\text{MJ}$$

Este intervalo significa que cualquier relación de consumo de energía y emisiones de CO₂ de origen fósil de cualquier producto o actividad en México, para llamarse sustentable (en los términos descritos de capacidad de carga óptima) tendrá que tener un *Grado de Emisión Energética de CO₂* (GEE_{CO_2}) menor o igual a 0.02918 kgCO₂/MJ. Valores mayores a 0.02918 kgCO₂/MJ superan la capacidad de carga de nuestro planeta y contribuyen a la acumulación de CO₂ en la atmósfera. Valores menores, apuntan hacia la sustentabilidad.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (MEMAC)

Como fue comentado en el capítulo uno del presente documento, para el desarrollo de la Metodología de Evaluación de Materiales de Construcción (MEMAC) que se presenta a continuación, se tomó como base la normatividad del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), adaptada para el caso mexicano en las normas mexicanas: NMX-SSA-14040-IMNC-2008 y NMX-SSA-14044-IMNC-2008 (Normas ISO).

Las etapas 1 y 2 de las Normas ISO, relacionadas con el Objetivo y Análisis del Inventario, se aplican prácticamente igual en la presente metodología, sin embargo, se hacen recomendaciones para su aplicación en los materiales de construcción, y se sugiere, una determinada preparación de la información, que permita la evaluación de ésta con relación al nuevo aspecto a considerar: la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra.

Las etapas 3 y 4 de las Normas ISO, relacionadas con la Evaluación e Interpretación de los datos, se ven modificadas sustancialmente, ya que la estructura sugerida por las Normas ISO, obedece, de manera general, al objetivo de relacionar los datos obtenidos en el Inventario con diferentes categorías de impacto, para determinar un indicador del impacto ambiental (ecoindicador), el cual podrá ser comparado con el ecoindicador de otro producto realizado bajo los mismos supuestos. La MEMAC, desarrolla y adecúa los datos obtenidos en la etapa del Análisis del Inventario para obtener, en cada uno de los procesos definidos y de manera global, el Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}), el cual compara con un solo valor (Capacidad de Carga Óptima de CO₂), lo cual permite determinar un nivel de sustentabilidad.

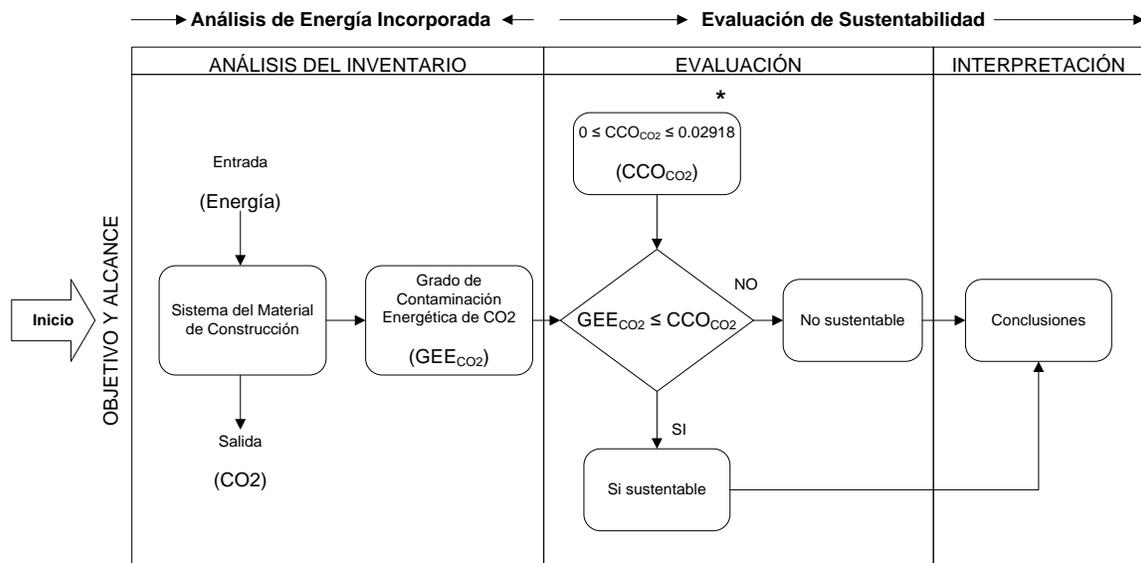
3.1. Descripción de la MEMAC

De acuerdo con los objetivos pretendidos por la MEMAC, y de una manera general, se puede dividir esta en dos partes principales:

- el análisis de la energía incorporada²⁰ y emisiones de CO₂ relacionadas, y
- la evaluación de sustentabilidad.

De la primera parte se obtiene el Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}), el cual se compara para determinar el nivel de sustentabilidad del material, con la Capacidad de Carga Óptima de CO₂ (CCO_{CO2}) calculada para México (Figura 5).

Figura 5. Etapas del proceso y flujo del proceso de la MEMAC



* Intervalo de Capacidad de Carga Óptima de CO₂, calculado para México.

Estas partes principales de la MEMAC, se dividen a su vez cada una en dos etapas. El análisis de energía incorporada contiene: 1) El Objetivo y Alcance del estudio, y 2) El Análisis del Inventario; la evaluación de la sustentabilidad: 3) La Evaluación, y 4) La Interpretación. El desglose de estas etapas se presenta a continuación en la Tabla 5.

²⁰ En el capítulo uno se optó por la definición del SERT, para determinar los alcances de un análisis de energía incorporada, los cual incluyen: la extracción de materias primas, el transporte y la fabricación del material (de la cuna a la puerta).

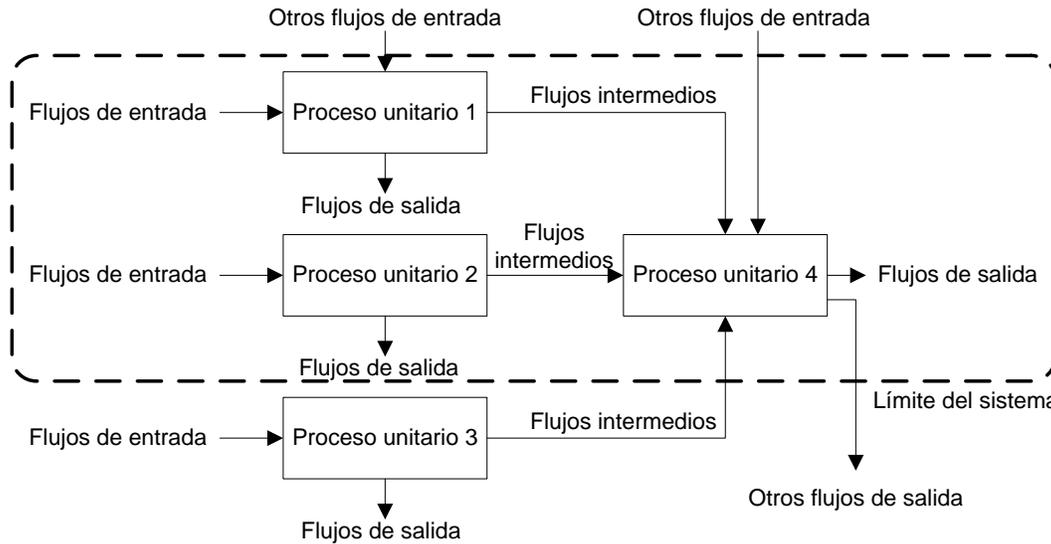
Tabla 5. Desglose de etapas de la MEMAC

1) Definición de Objetivo y del Alcance
a) Objetivo del estudio
<i>i) Aplicación prevista</i>
<i>ii) Razones para realizar el estudio</i>
<i>iii) Público objetivo</i>
b) Alcance del estudio
<i>i) El sistema del material</i>
<i>ii) Descripción de procesos</i>
<i>iii) Unidad funcional</i>
<i>iv) Límite del sistema (criterios de inclusión)</i>
2) Análisis del Inventario
a) Cálculos preliminares
<i>i) Calidad de los datos utilizados</i>
b) Cálculo de procesos unitarios
<i>i) Cálculo de procesos individuales</i>
<i>ii) Cálculo de procesos del sistema</i>
<i>iii) Calidad de los datos utilizados</i>
c) Concentrado de procesos
3) Evaluación
a) Análisis de integridad
b) Análisis de Sensibilidad
c) Análisis de coherencia
d) Análisis de resultados
4) Interpretación

3.1.1. Objetivo y alcance del estudio

En esta etapa, se pretende obtener como producto, una adecuada definición del *sistema del material* de construcción a analizar (Figura 6), el cual consiste en un diagrama de flujo donde se especifican claramente, dentro de un esquema general, los diferentes procesos unitarios y flujos de entradas y salidas que se pretende considerar en el análisis, así como los criterios de inclusión (límite del sistema) y el nivel de profundidad del análisis.

Figura 6. Ejemplo de sistema del material



Un *proceso unitario*, es una actividad o grupo de actividades consideradas como una unidad dentro del sistema del material a analizar, sobre la que se llevará a cabo la cuantificación de entradas y salidas. De acuerdo con Suppen (2005), dentro del sistema industrial se pueden identificar tres diferentes tipos de procesos:

- procesos necesarios para la producción, uso, transporte o tratamiento de desechos;
- procesos para la producción de materiales auxiliares, como empaques, consumibles o máquinas; y
- procesos para la producción de la energía necesaria para el sistema.

A los primeros, los podemos llamar procesos principales; a los segundos, procesos auxiliares; mientras que a los últimos, procesos complementarios.

Según la NMX-SAA-IMNC-14040-2008 (3.21 y 3.25), las *entradas y salidas* se refieren al flujo de productos, materia o de energía que entran o salen de un proceso unitario. Como flujos de entrada se pueden reconocer:

- la materia prima básica que se considera necesaria en cada uno de los procesos unitarios (materiales principales);
- las entradas auxiliares, que son las que entran en el proceso unitario de obtención de un material, pero que no constituyen una parte del mismo, tal como aditivos, empaques, lubricantes, etc., (materiales auxiliares);
- los flujos intermedios, o subproductos que surgen en cada proceso unitario y se convierten en insumos de otros procesos unitarios;
- la energía demandada en cada proceso unitario, en sus tipos: combustibles fósiles, energía renovable, energía nuclear y biomasa; y
- la electricidad y la energía necesaria para producirla. La autoproducción de energía también puede considerarse.

Se recomienda excluir como entradas: la iluminación, calefacción y aire acondicionado demandado por la planta industrial; el agua utilizada, y materiales auxiliares requeridos en el mantenimiento de equipos y edificio.

Como flujos de salida, de acuerdo con los objetivos de la MEMAC ya expuestos, se consideran exclusivamente, las emisiones de CO₂, dejando fuera el resto de emisiones a la atmósfera, emisiones a la tierra, emisiones al agua, y desechos.

De manera general, en la definición del *Objetivo del estudio*, se pretende especificar con claridad, la aplicación prevista del estudio, el material de construcción a analizar, las razones para realizar el análisis y el público a quien se prevé comunicar los resultados del estudio.

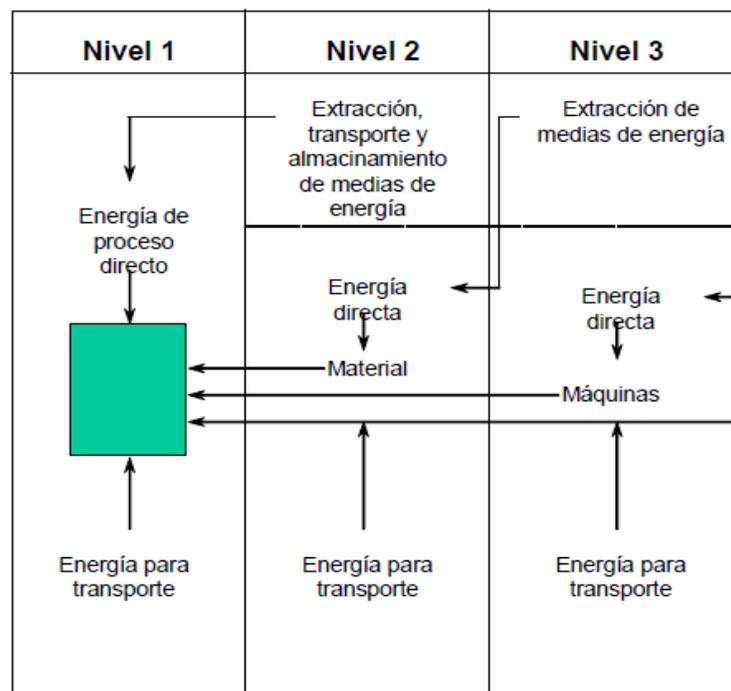
En el *Alcance*, se pretende asegurar la amplitud, profundidad, el nivel de detalle del estudio y su congruencia con el Objetivo establecido. Se describe en esta etapa el sistema del material, los procesos unitarios y la *unidad funcional*, la cual es la referencia sobre la cual se normalizan los datos de los flujos de entrada y salida. Ésta consiste en una unidad de producción del material a analizar, tal como: un kilo, una tonelada, o cualquier otra unidad que se considere conveniente.

Se recomienda considerar una unidad de producto terminado (material listo para comercializarse), sin embargo, esto depende de los objetivos pretendidos en el estudio.

Se especifican también, los *criterios de inclusión*, es decir, las razones para la inclusión o exclusión de los flujos de entrada y salida, y de los procesos unitarios del sistema del material. Se debe puntualizar hasta dónde llegará el estudio pretendido (*límite del sistema*), detallando qué procesos unitarios se tomarán en cuenta, y qué flujos de entrada y salida serán considerados.

De acuerdo con Suppen (2005), en la definición del *nivel de profundidad* de las entradas y salidas del sistema del material en estudio, se identifican varios niveles (Figura 7).

Figura 7. Nivel de profundidad de entradas y salidas del sistema.



Fuente: Suppen (2005b).

- El nivel uno, considera todos los materiales, energía y emisiones que están directamente relacionados con los procesos principales.

- En el nivel dos se considera además, la energía necesaria e impactos causados por la producción de la energía que se utilice en el proceso de nivel uno (procesos complementarios), más la energía e impactos causados para la producción de las máquinas que se usan en el proceso de transformación directo (procesos auxiliares).
- El nivel tres, incluye los procesos que se usan para la producción de las máquinas que se utilizan para la producción de máquinas utilizadas en el proceso de transformación del nivel uno.

De acuerdo con Capman (1983) citado por Suppen (2005b), del 70% al 90% de los impactos, energía y emisiones, están causados por el primer nivel; en el nivel dos, el autor estima entre un 10% y un 30%; de 0 a 10% en el tercer nivel y menos de 1% en un cuarto nivel. De esta forma, si se considera un nivel de profundidad dos en las entradas y salidas del sistema, se estarían considerando como mínimo un 80% de estas. Sin embargo, dado que puede ser muy difícil y engorroso en un nivel dos, considerar los impactos, energía y emisiones de procesos auxiliares, tal como producción de maquinarias, se recomienda considerar, sólo los procesos complementarios de producción de energía. Con esto se asegura tener como mínimo un valor cercano al 80% de los impactos, energía y emisiones generadas.

3.1.2. Análisis del Inventario

En esta etapa, se realiza la cuantificación de los diferentes flujos de entrada y salida, en los procesos unitarios definidos en el sistema del material, tomando como base la unidad funcional. Se compone de la recopilación y cálculo de los datos, los cuales se preparan para obtener como producto de esta etapa, el Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}).

La cuantificación se lleva a cabo, siguiendo los siguientes pasos:

1. Cálculos preliminares
2. Cálculos de procesos unitarios (individuales y del sistema)
3. Concentrado de procesos

Al final de cada paso, se debe analizar la calidad de los datos utilizados, para lo cual, se describe el tipo de fuente consultada, y se señala: la antigüedad, la geografía, la tecnología y la representatividad de los datos utilizados.

3.1.2.1. Cálculos preliminares

Los *cálculos preliminares* consisten en la realización de análisis previos de los procesos complementarios del sistema, como pueden ser: producción de electricidad; el transporte de carga; y extracción de materiales de mina, entre otros. Una razón para definirlos como tales, puede ser la ausencia de información suficiente que permita un análisis desglosado de los procesos que los integran. Tienen la particularidad de analizar como flujo de entrada exclusivamente, la energía. El objetivo de los cálculos preliminares, es obtener un factor de emisión de CO₂ en kilogramos por Megajoule de energía consumida (kg de CO₂/Mj) de cada uno de estos procesos, mismo que facilitará el cálculo de los procesos unitarios del sistema considerado.

Para la obtención del total de energía consumida en cada proceso complementario considerado, se tendrán que contabilizar (en Megajoules) los diferentes tipos de energía que se utilicen, clasificados en: procedente de combustibles fósiles, energía renovable, energía nuclear y procedente de la biomasa. Sin embargo, para la obtención del factor de emisión de CO₂, se podrán realizar los cálculos sobre la base exclusiva de los combustibles fósiles utilizados, ya que, según fue comentado en el capítulo 2, desde el punto de vista de emisiones de CO₂, las energías renovables y energía nuclear se consideran limpias, mientras que la energía procedente de la biomasa, por su pequeña participación en el total de energía consumida (en promedio 4.8% del total en México), y por la ausencia de suficiente información estadística publicada, en esta metodología no es tomada en cuenta.

Un paso previo en el cálculo del factor de emisión del proceso considerado, es la obtención del factor de emisión de CO₂ de cada combustible fósil. Para esto, se recomienda utilizar la metodología²¹ expresada en las Directrices del IPCC de 2006 (IPCC, 2006)²², la cual se basa en el seguimiento y cuantificación de los consumos de combustibles fósiles y sus emisiones. De manera general, su metodología se puede resumir en los siguientes pasos:

- Identificación del poder calorífico²³ de cada combustible fósil. Se recomienda utilizar valores nacionales, los cuales pueden consultarse en el Balance Nacional de Energía que publica la Secretaría de Energía (SENER, 2007), y complementar con los valores por defecto, publicados en las Directrices del IPCC.
- Convertir los datos a una unidad energética común (el poder calorífico, expresa la cantidad de energía por unidad de medida del combustible, la cual puede estar expresada en kg, tonelada, m³, barril, etc., por lo que se recomienda uniformizarlos en Megajoules por tonelada (Mj/t)).
- Seleccionar factores de contenido de carbono para cada tipo de combustible utilizado, y estimar el contenido de carbono de los combustibles fósiles consumidos.
- Convertir el carbono a peso total de moléculas de CO₂ y sumar los resultados de todos los combustibles.

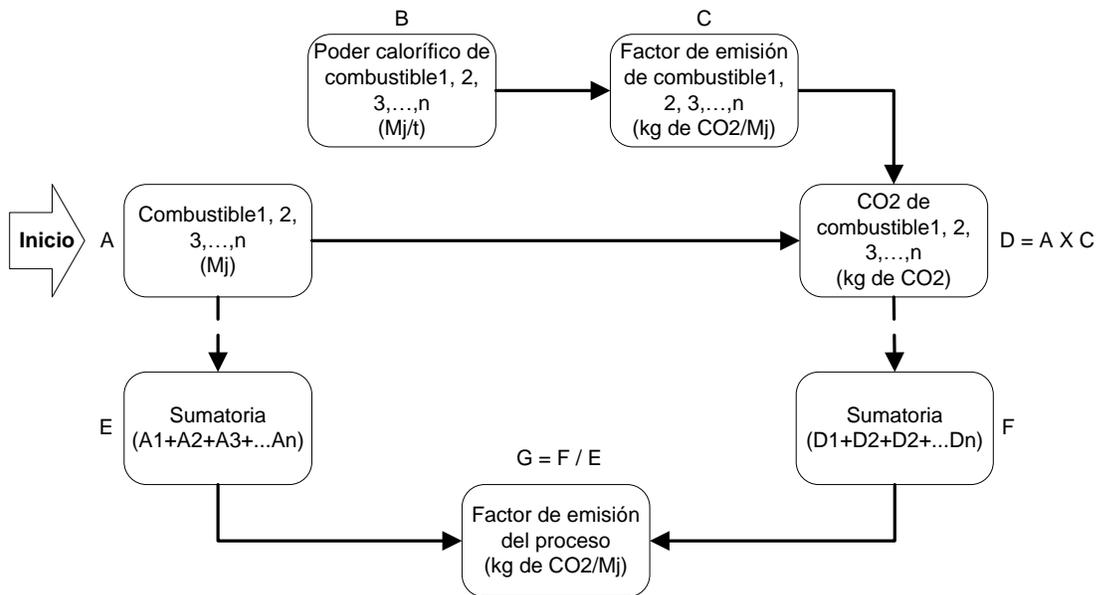
²¹ Las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero fueron concebidas específicamente para que los países elaboren y declaren los inventarios de gases de efecto invernadero en virtud del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).

²² De acuerdo con la metodología para la realización de inventarios de GEI expuesta en las Directrices del IPCC (2006: II, 1.3), se considera que las condiciones de combustión (eficacia, carbón retenido en la escoria y las cenizas, etc.) del CO₂ tienen poca importancia relativa. Por lo que es posible estimar emisiones de CO₂ con bastante exactitud, sobre la base del total de los combustibles quemados y del contenido de carbono promediado de los combustibles.

²³ Es la cantidad de calor que se libera en un proceso de combustión. En las estadísticas de energía se utilizan indistintamente el poder calorífico bruto o el poder calorífico neto. Poder calorífico bruto (PCB), es la cantidad total de calor que se produce en la combustión. Poder calorífico neto (PCN), es la cantidad de calor que se produce en la combustión, excluyendo el calor no recuperable. Equivale al calor del proceso de combustión que se aprovecha en la práctica (SENER, 2007).

El procedimiento de cálculo del factor de emisión de procesos complementarios considerados, tiene la siguiente secuencia (Figura 8):

Figura 8. Procedimiento de cálculo del factor de emisión de CO₂ de procesos



- Se determina la cantidad de energía total que consume el proceso (en Megajoules), y se identifica la contribución de cada uno de los combustibles fósiles utilizados.
- Con base en la metodología que proponen las Directrices del IPCC (IPCC, 2006), se calcula el factor de emisión de CO₂ de cada combustible.
- Posteriormente, se multiplica éste factor, por la contribución de cada combustible utilizado (cantidad en Megajoules), con lo que se obtiene, la cantidad de CO₂ en kilogramos que aporta cada combustible, al total emitido en el proceso.
- Este proceso se realiza para cada uno de los combustibles identificados en el proceso, y se realiza una sumatoria del total de CO₂.
- Finalmente, se divide este total de CO₂, entre la cantidad de energía total que consume el proceso, la cual equivale a la sumatoria de las contribuciones de cada combustible utilizado, obteniéndose así, un factor de emisión de CO₂ en kilogramos por Megajoule, del proceso analizado.

Con la información obtenida, se pueden determinar otros factores que pueden resultar útiles para los cálculos posteriores, tales como: CO₂ por tonelada de material, de combustible utilizado, por producción, por kilómetro, etc.

3.1.2.2. Cálculo de procesos unitarios

El cálculo de los cálculos de procesos unitarios, consta de dos partes principales, cuya diferencia sustancial consiste, en la cantidad de material considerada para su cálculo. En la primera (*cálculo de procesos individuales*), se realizan los cálculos considerando la producción de una tonelada de material en cada proceso. Lo anterior, además de flexibilizar los cálculos cuando así se requiera, facilita la identificación de la contribución de los procesos al aporte total de emisiones del sistema, y la extracción de conclusiones. En la segunda (*cálculo de procesos en el sistema*) cada proceso unitario se analiza con la cantidad de materiales necesarios para producir la unidad funcional ya definida en el Objetivo y Alcance del estudio, se recomienda considerar una tonelada de material terminado (comercializable).

Ambos cálculos, inician con la identificación de las cantidades de cada uno de los flujos de materiales, energía (incluyendo la electricidad como energía) y productos, en cada uno de los procesos del sistema considerado. Se continúa con el cálculo de la cantidad de emisiones de CO₂ que se producen, para lo cual se calcularán factores de emisión de CO₂ con base en la metodología de las Directrices del IPCC, y siguiendo el procedimiento mencionado en el apartado de cálculos preliminares (Figura 8).

3.1.2.3. Concentrado de procesos

Finalmente se realiza, un *concentrado de procesos*, tanto individual como del sistema, el cual presenta en resumen, la cantidad de energía demandada por cada proceso unitario (en Megajoules por tonelada), y la cantidad de CO₂ que se emite (en kilogramos por tonelada). Esta etapa culmina con el cálculo del Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}), el cual es el cociente de la división de la cantidad de emisiones de CO₂ entre la cantidad de energía demandada (kg de CO₂/Mj).

3.1.3. Evaluación

Se basa en el comparativo de la Capacidad de Carga Óptima de CO₂ (CCO_{CO2}) calculada para México, la cual está dada por: $0 \leq \text{CCO}_{\text{CO}_2} \leq 0.02918 \text{ kgCO}_2/\text{MJ}$, y el GEE_{CO2} del material considerado en el análisis. Si el GEE_{CO2} es mayor que la CCO_{CO2}, entonces el material se considera no sustentable; si es menor, entonces es sustentable.

La MEMAC, al igual que el ACV, presenta limitaciones relacionadas con la incertidumbre de los datos utilizados, los métodos y la subjetividad inherente a las elecciones basadas en juicios de valor, tal como los criterios de inclusión entre otros. Para fortalecer la confianza y la fiabilidad en los resultados del estudio, las Normas ISO (NMX-SAA-IMNC-14044-2008, 4.4.3), recomiendan la utilización de las tres técnicas siguientes:

- Análisis de integridad, que persigue el objetivo de asegurar la suficiencia y pertinencia de los datos. Se basa en una lista de verificación de la información requerida.
- Análisis de sensibilidad, intenta determinar la influencia de las variaciones en las suposiciones, métodos y datos en los resultados.

- Análisis de coherencia, busca verificar la coherencia de la información por medio del análisis de la bibliografía y fuentes consultadas (calidad de los datos). Puede realizarse este, en la etapa del Inventario, inmediato a la presentación de los datos.

3.1.4. Interpretación

En la etapa de Interpretación, se determina el nivel de sustentabilidad del material analizado, el cual consiste en la identificación de la proporción en porcentaje del GEE_{CO₂} con respecto de la CCO_{CO₂}. A la vez que se plantean conclusiones de los resultados encontrados, se intenta ofrecer una lectura comprensible de los mismos.

3.2. Características de la metodología

Se presentan a continuación las principales características de la MEMAC:

- La MEMAC, hace uso de la metodología del ACV, pero lo adapta para evaluar el nivel de sustentabilidad de materiales de construcción.
- Al igual que el ACV, utiliza una unidad funcional sobre la que se realiza todo el análisis, lo cual facilita la realización de los cálculos, su evaluación y comparación.
- Al considerar el ciclo de vida de los materiales, permite tener una visión completa del sistema considerado.
- Para uniformizar criterios en estudios comparativos de materiales, sugiere un nivel de detalle y profundidad.
- Utiliza la metodología de las Directrices del IPCC para la determinación de factores de emisión de CO₂.
- Sugiere un procedimiento para el desarrollo del Análisis del Inventario de entradas y salidas.

- Utiliza la relación de energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil (*Grado de Emisión Energética de CO₂*) para determinar un factor que posibilite la evaluación del nivel de sustentabilidad.
- Proporciona un parámetro de comparación llamado *Capacidad de Carga Óptima de CO₂* calculado para México, para aplicarse en la etapa de evaluación, el cual se basa en la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SUSTENTABILIDAD DEL ACERO

4.1. Definición del objetivo y del alcance

4.1.1. Objetivo del estudio

4.1.1.1. Aplicación prevista.

El presente análisis se realizará con fines académicos, para tener una visión global del impacto ambiental de la producción de acero en México desde la etapa de extracción hasta su producción en la industria, lo que suele llamarse “de la cuna a la puerta”. Pretende ayudar a conocer y describir la problemática ambiental en cuanto a energía y emisiones de CO₂, que existe alrededor de la producción de acero en México y determinar su nivel de sustentabilidad.

4.1.1.2. Razones para realizar el estudio.

La industria siderúrgica en México es uno de los sectores más importantes de la economía nacional, y también, uno de los sectores que más impacta al ambiente. Así lo demuestran los siguientes datos:

De acuerdo con la CANACERO (2008),

- a) Produce el 1.3% del total de acero en el mundo, lo que lo ubica en 15º lugar y en el 2º lugar de Latinoamérica.
- b) A nivel nacional su producción alcanza el 2.2% del Producto Interno Bruto total (PIB total), y el 9% del Producto Interno Bruto industrial (PIB industrial).
- c) Es el primer consumidor de electricidad y de gas natural (seco) en el país (7.3 y 29.1% del total nacional respectivamente).
- d) Como usuario del transporte de carga, alcanza el 4.84% del total nacional.
- e) Sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) alcanzan el 5.15% del total nacional (INE-SEMARNAT, 2006).
- f) De las ventas totales de productos siderúrgicos, el 26.4% se realizan en el sector de la construcción (INEGI, 2007: III, 3.1.2).

Sin embargo, ante la problemática del cambio climático, no se sabe con certeza en México, cuánta energía es demandada en las diferentes etapas de la producción de acero, desde la etapa de extracción hasta su fabricación, y la cantidad de emisiones de CO₂ relacionadas. No se sabe, en términos de capacidad de carga, en qué medida impactan al ambiente las diferentes tecnologías de producción de acero. No se cuenta con bases de datos de consumos de energía y emisiones de CO₂ de los diferentes procesos de producción de acero.

4.1.1.3. Público objetivo.

El trabajo será comunicado a la comunidad académica principalmente.

4.1.2. Alcance del estudio

4.1.2.1. El sistema del producto y su función.

El presente análisis considera la producción de acero comercial por empresas de tipo “integradas”²⁴, ya que en promedio, cerca del 75% de las empresas productoras de acero en México, corresponden a esta clasificación (INEGI, 2007: II, 2.2.10).

Considerando las etapas de la cuna a la puerta, se pueden identificar de manera general tres etapas: 1) Extracción de minerales y su manufactura, 2) Transporte de los mismos a la industria y 3) Producción de acero sólido²⁵.

²⁴ De manera general existen cuatro tipos de empresas dedicadas a la producción de acero: a) Instalaciones principales que producen a la vez hierro y acero; b) Instalaciones secundarias de fabricación de acero; c) Plantas de producción de hierro; y d) Producción de coque metalúrgico fuera de la instalación (IPCC, 2006: IV, 10). Una empresa integrada de producción de acero dispone de instalaciones tanto para la reducción del mineral del hierro como para la acería y laminación.

²⁵ La etapa de producción de acero sólido se puede separar en tres partes principales, en las cuales se obtienen los siguientes productos: de la primera parte se obtiene como producto el *arrabio*, el cual se fabrica en el Alto Horno (BF), y el *hierro esponja*, que proviene del proceso de Reducción Directa (DRI); en la segunda parte, el hierro se mezcla con carbón e insumos básicos por los métodos de Horno Básico de Oxígeno (BOF) y Horno de Arco Eléctrico (EAF), obteniendo como producto *acero líquido*; la tercera parte con la cual concluye la acería es la “Colada Continua”, de la cual se obtiene *acero sólido* en cuatro diferentes tipos: planchón, tocho, palanquilla y redondo para tubo. (INE-SEMARNAT, 2006: 108), (INEGI, 2007: II, 2.2.12).

La adquisición de materiales inicia con la extracción de estos en las minas, los cuales son manufacturados en sitio para convertirse en materia prima (p. ej., el proceso de peletizado) o son transportados a la industria para alimentar los diferentes procesos de producción de acero.

El transporte a la planta industrial de los materiales extraídos y/o manufacturados en sitio, se realiza por tren y por autotransporte de carga; sin embargo, en algunas empresas integradas, una parte importante de los materiales extraídos de mina son transportados a las instalaciones de la planta por medio de sistemas externos de transportación (bandas transportadoras, bombeo por tubería, etc.)²⁶.

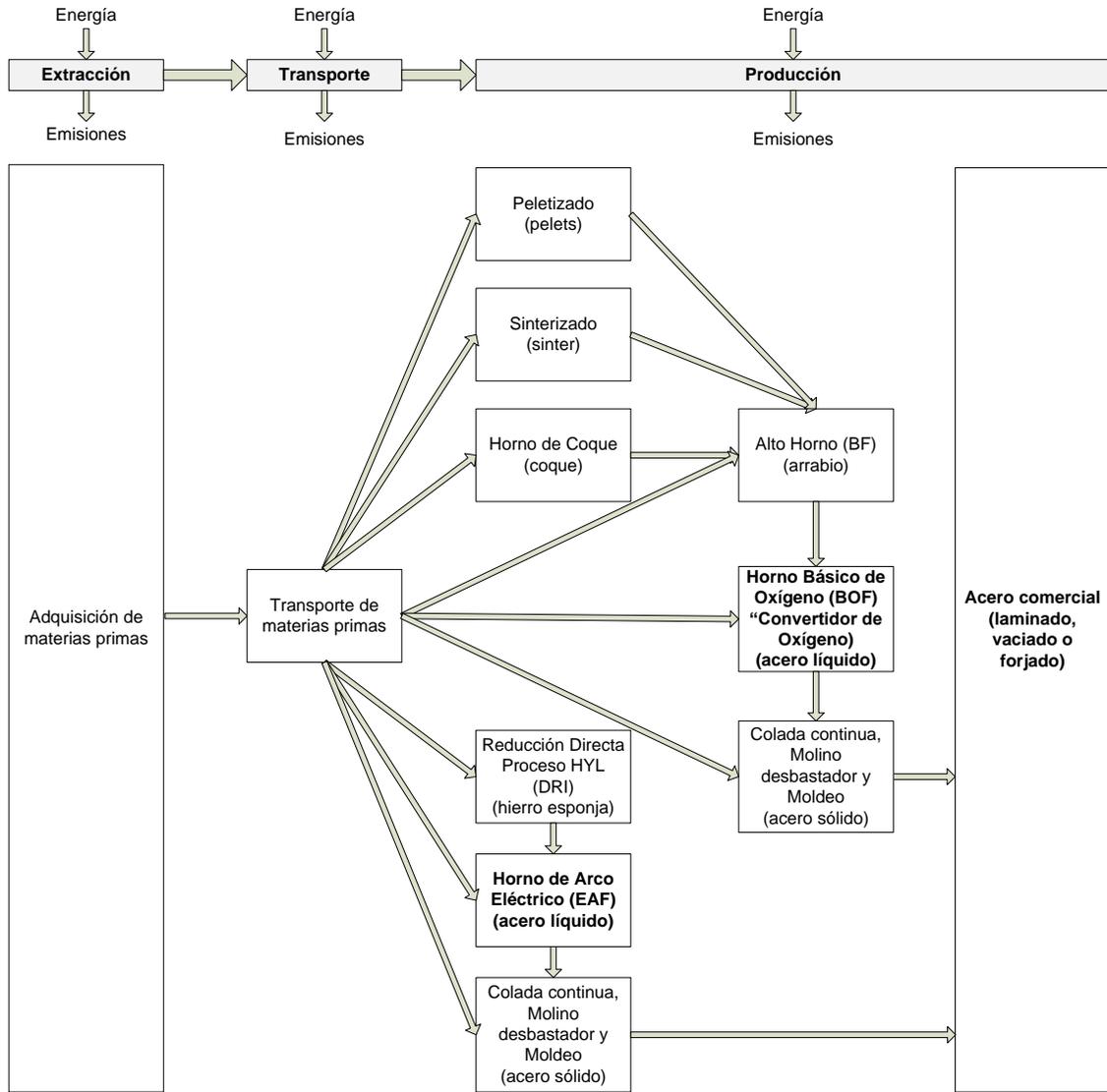
Los recursos materiales y energéticos demandados por estos sistemas externos, normalmente son considerados como parte de los consumos industriales, por lo que no se encontró información desagregada de sus requerimientos energéticos particulares.

Las tecnologías más comúnmente utilizadas para la producción de acero en México y Latinoamérica de acuerdo con el INE-SEMARNAT (2006: 109) son: el método de Alto Horno y Horno Básico de Oxígeno²⁷ (*BF+BOF, por sus siglas en inglés*) y el método de Reducción Directa (proceso HYL) y Horno de Arco Eléctrico (*DRI+EAF, por sus siglas en inglés*) (Figura 9).

²⁶ En 2007, la empresa Altos Hornos de México SA (AHMSA), una de las empresas integradas productoras de acero más importantes del país, transportó de la mina a la planta industrial el 80% de los materiales extraídos por medio de sistemas externos de transportación (AHMSA, 2007: 51-58).

²⁷ También conocido como “Convertidor de Oxígeno”.

Figura 9. Proceso general de producción de acero con tecnología Horno Básico de Oxígeno (BOF) y Horno Eléctrico de Arco (EAF).



Fuente: Elaboración propia con base en información del European IPPC Bureau (2001).

En México, la producción de acero que utiliza el método de BF+BOF, alcanza el 29% en promedio, mientras que el 71% restante se produce por el método DRI+EAF (INEGI, 2007: II, 2.2.8). Por su importancia, se analizarán ambas tecnologías.

El procedimiento de “*Colada Continua*” para producción de acero sólido es el más utilizado en México, ya que la producción por este método alcanza en promedio el 98% de la producción nacional. El resto corresponde a “Molino Desbastador” y a “Fundición” (Moldeo) (INEGI, 2007: II, 2.2.12). Se puede considerar que el 100% de la producción de acero comercial proviene del proceso de “*Laminación*”²⁸, ya que del total de acero sólido producido por los diferentes procedimientos, el 99.9% corresponde a este proceso (INEGI, 2007: II, 2.2.8).

4.1.2.2. Descripción de procesos

Procesos unitarios de la tecnología BF+BOF

- Producción de pelets. En el sitio de la mina normalmente se encuentran las plantas de peletización²⁹, pero pueden formar parte de las instalaciones de una planta integrada de hierro y acero. En estas plantas, como combustible puede usarse el gas natural o el carbón; en las plantas situadas dentro de una instalación integrada de hierro y acero, puede usarse el gas de horno de coque. La producción de pelets se utiliza principalmente en la producción de arrabio en el alto horno.
- Producción de coque. El coque metalúrgico es el producto sólido obtenido de la carbonización a altas temperaturas del carbón, principalmente el carbón de coque. El gas de horno de coque es un producto derivado de la fabricación del coque metalúrgico que puede quemarse para calentar los hornos de coque o transferirse internamente en la planta de hierro y acero, así como utilizarse en la producción de sinterizado o en el proceso de producción del hierro. El gas de horno de coque puede transferirse también fuera de la instalación (p. ej., hacia el sistema de distribución de gas natural) y emplearse como fuente de energía.

²⁸ La laminación, es un método que utiliza el acero sólido producido por la colada continua (planchón, tocho, palanquilla, redondo para tubos) para producir productos metálicos comercializables.

²⁹ Los pelets se forman a partir de materias primas que contienen hierro (esto es, mineral fino y aditivos), en un proceso a muy altas temperaturas que los reduce a esferas de 9-16 mm de diámetro. El proceso incluye el molido, el secado, la granulación y el tratamiento térmico de las materias primas (IPCC, 2006: II).

Como combustible también se utiliza el gas de alto horno y vapor. El coque metalúrgico se utiliza principalmente en los altos hornos para fabricar hierro. Se emplea también en otros procesos metalúrgicos tales como la fabricación de hierro fundido.

- Producción de sinterizado. El mineral de hierro y otros materiales que contienen hierro puede aglomerarse en las plantas de sinterización de las plantas integradas de hierro y acero, antes de introducirlo en el alto horno. El coque es el material de proceso más utilizado en las plantas de sinterización. El gas de alto horno o el gas de horno de coque producido internamente durante la producción integrada de hierro y acero pueden utilizarse en las plantas de sinterización. El sinter producido alimenta el alto horno.
- Alto horno (BF). Durante la combustión del coque en el BF, se produce gas de alto horno. Típicamente, se recupera y utiliza como combustible, en parte dentro de la planta y en parte en otros procesos de la industria del acero, o bien, en centrales eléctricas equipadas para quemarlo. También, el gas de alto horno puede recuperarse para transferirse desde la forja de hierro y acero hacia la planta interna de coque y quemarse para obtener energía dentro de los hornos de coque. El gas de alto horno puede transferirse igualmente fuera de la instalación y emplearse como fuente de energía, tanto dentro del horno como al quemarlo para calentar el aire inyectado. También el gas de horno de coque y el gas natural, pueden utilizarse como combustibles. El alto horno produce arrabio, el cual es dirigido al BOF.
- Horno básico de oxígeno (BOF). El hierro de alto horno (arrabio) contiene generalmente un 3-4 por ciento de carbono, el cual debe ser reducido en el BOF a menos de un 1 por ciento, refinado y aleado para producir el grado de acero deseado. Utiliza el gas de horno de coque, coque y vapor como combustibles. El gas de horno de oxígeno para aceros se obtiene como producto derivado de la producción del acero en un BOF y se recupera a la salida del horno.

El producto obtenido del BOF es acero líquido, el cual pasa por el proceso de Colada Continua para solidificarse y por el proceso de Laminación para convertirse en productos terminados.

- Laminación. En el proceso de laminación en caliente, el tamaño, la forma y las propiedades metalúrgicas del acero se modifican comprimiendo repetidamente el metal caliente (a temperaturas de entre 1.050°C y 1.300°C) entre cilindros accionados por motores eléctricos. Este proceso se utiliza para transformar fundición de acero en diversas formas: lingotes, planos, tochos, palanquillas o perfiles, según el producto que se vaya a fabricar. Los productos obtenidos por laminación en caliente suelen clasificarse en dos tipos según su forma: planos y alargados (EPER-España: 2008).

Procesos unitarios de la tecnología DRI+EAF.

- Reducción directa del acero (DRI). La reducción directa implica la reducción del mineral de hierro extraído de mina, en hierro metálico en el estado sólido a temperaturas inferiores a 1 000 °C. También se utilizan pelets como materia prima en plantas integradas. El DRI (hierro esponja) obtenido, se emplea normalmente en reemplazo de la chatarra metálica para la fabricación de acero por la vía del EAF, pero puede utilizarse también como alimentación al proceso de fabricación de hierro en alto horno. Normalmente se emplea el gas natural como agente reductor.
- Horno de arco eléctrico (EAF). La producción de acero en un EAF se realiza típicamente mediante una carga de chatarra de acero reciclado y/o de hierro esponja del proceso de DRI, el cual se funde utilizando la energía eléctrica que se aplica a la carga mediante electrodos de carbono; luego se refina y se alea para producir el grado de acero deseado. El producto obtenido del EAF es acero líquido, el cual pasa por el proceso de Colada Continua para solidificarse y por el proceso de laminación para convertirse en productos terminados comercializables.

4.1.2.3. Unidad funcional:

Producir una tonelada de acero comercial.

4.1.2.4. Límite del sistema (criterios de inclusión)

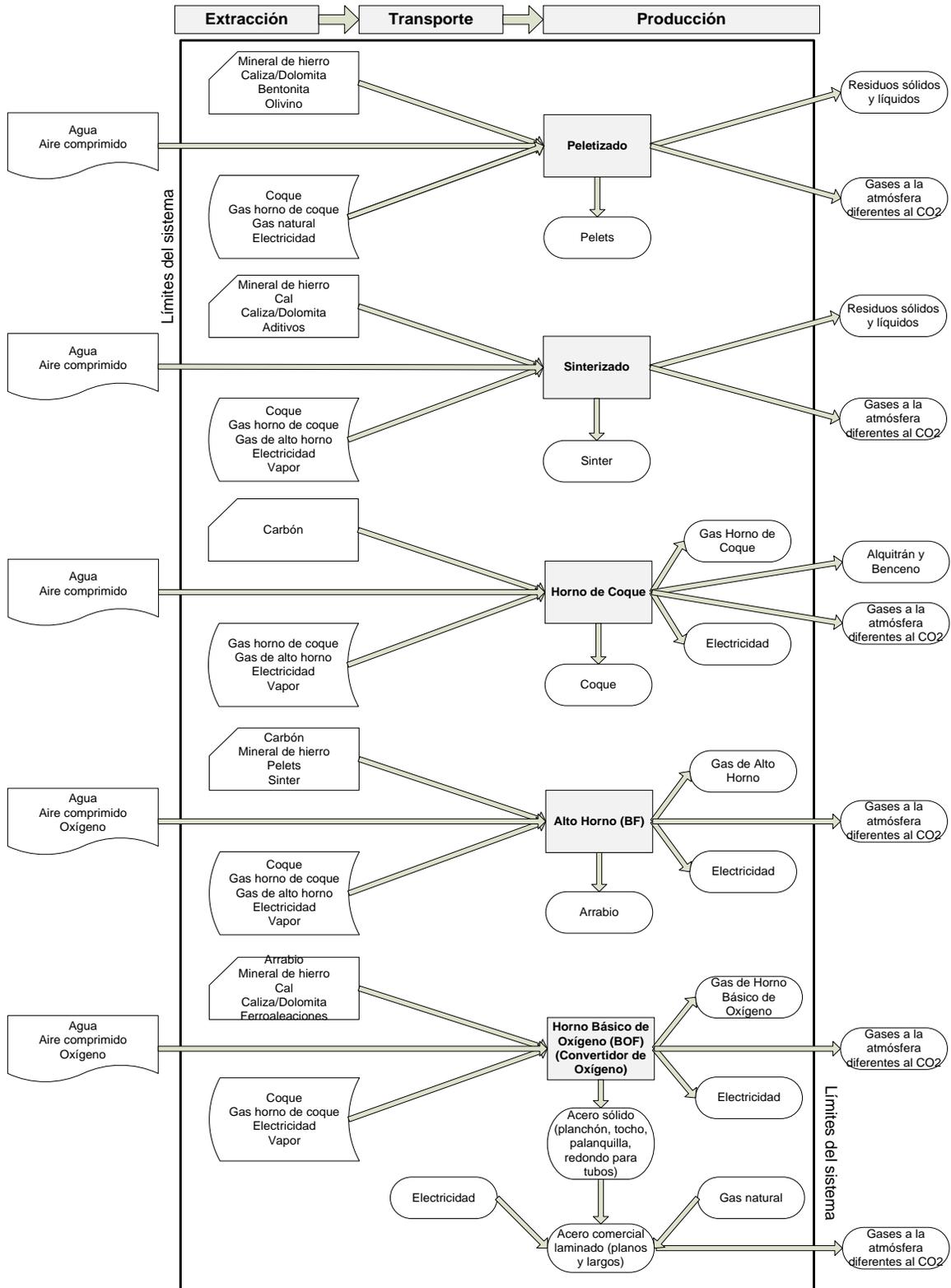
El objetivo principal de este estudio está enfocado al análisis de los consumos de energía y de emisiones de CO₂ de origen fósil relacionadas. De manera general, el sistema de producción del acero que se analiza, considera como “entradas” los flujos de los materiales y producción de energía que se utilizan como componentes del producto resultante para la realización de cada uno de los procesos, y los flujos de productos derivados entre los procesos (Figura 9 y 10).

Se considera también la electricidad y la energía necesaria para producirla. No considera entradas auxiliares (las que no forman parte del producto resultantes) de materiales y energía. Por lo tanto, no serán consideradas como entradas las siguientes:

- La energía y materiales para fabricar la maquinaria utilizada ni las máquinas para fabricar estas; tampoco se considera el mantenimiento de las mismas.
- La recuperación de productos utilizados, excepto la recuperación de energía.
- La producción de materiales auxiliares.
- Operaciones adicionales, tales como iluminación y calefacción de las instalaciones.
- Por estar fuera de los objetivos del presente análisis, los flujos de agua en el sistema tampoco son considerados.

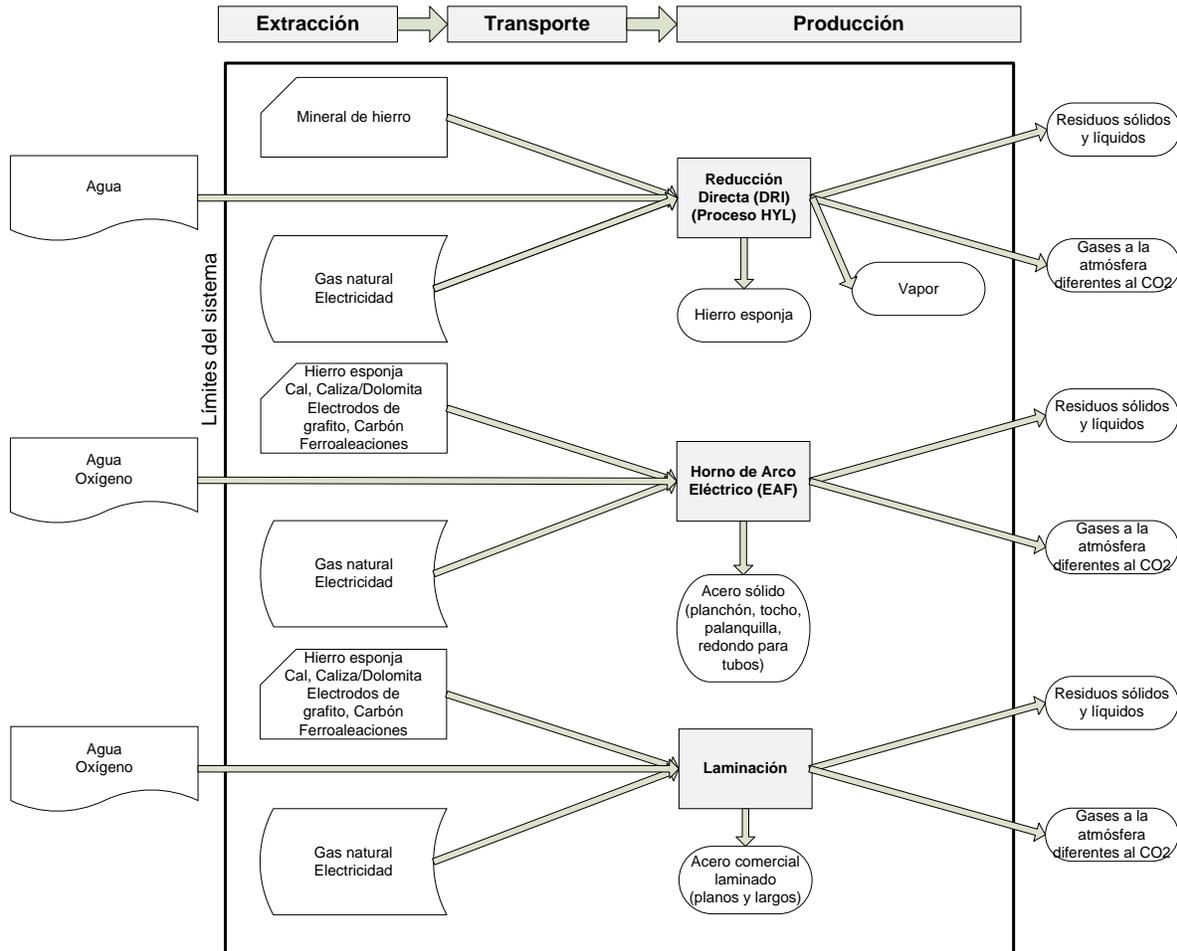
Con relación a las “salidas”, y de acuerdo con los objetivos ya expuestos, el análisis se centrará en las emisiones de CO₂, dejando fuera el resto de las emisiones a la atmósfera, las emisiones a la tierra, las emisiones al agua y los desechos.

Figura 9. Procesos unitarios de la tecnología BF+BOF



Fuente: Elaboración propia con información del IPCC (2006: II); IPCC (2001) e IPCC (2008).

Figura 10. Procesos unitarios de la tecnología DRI+EAF.



Fuente: Elaboración propia con información del IPCC (2006: II); IPCC (2001) e IPCC (2008).

La producción de acero comercial con las dos tecnologías ya mencionadas, demanda para cada proceso, la utilización de los materiales y energía presentados en las Figuras 11 y 12, y considera dentro de sus límites, la extracción en minas. De acuerdo con el IPCC (2001), se requiere también de aire comprimido en algunos procesos, sin embargo, la energía eléctrica necesaria para generarlo se considera incluida en el total de electricidad que se reporta, por lo que no se incluirá en todos los casos. La producción de electricidad si es considerada en todos los casos.

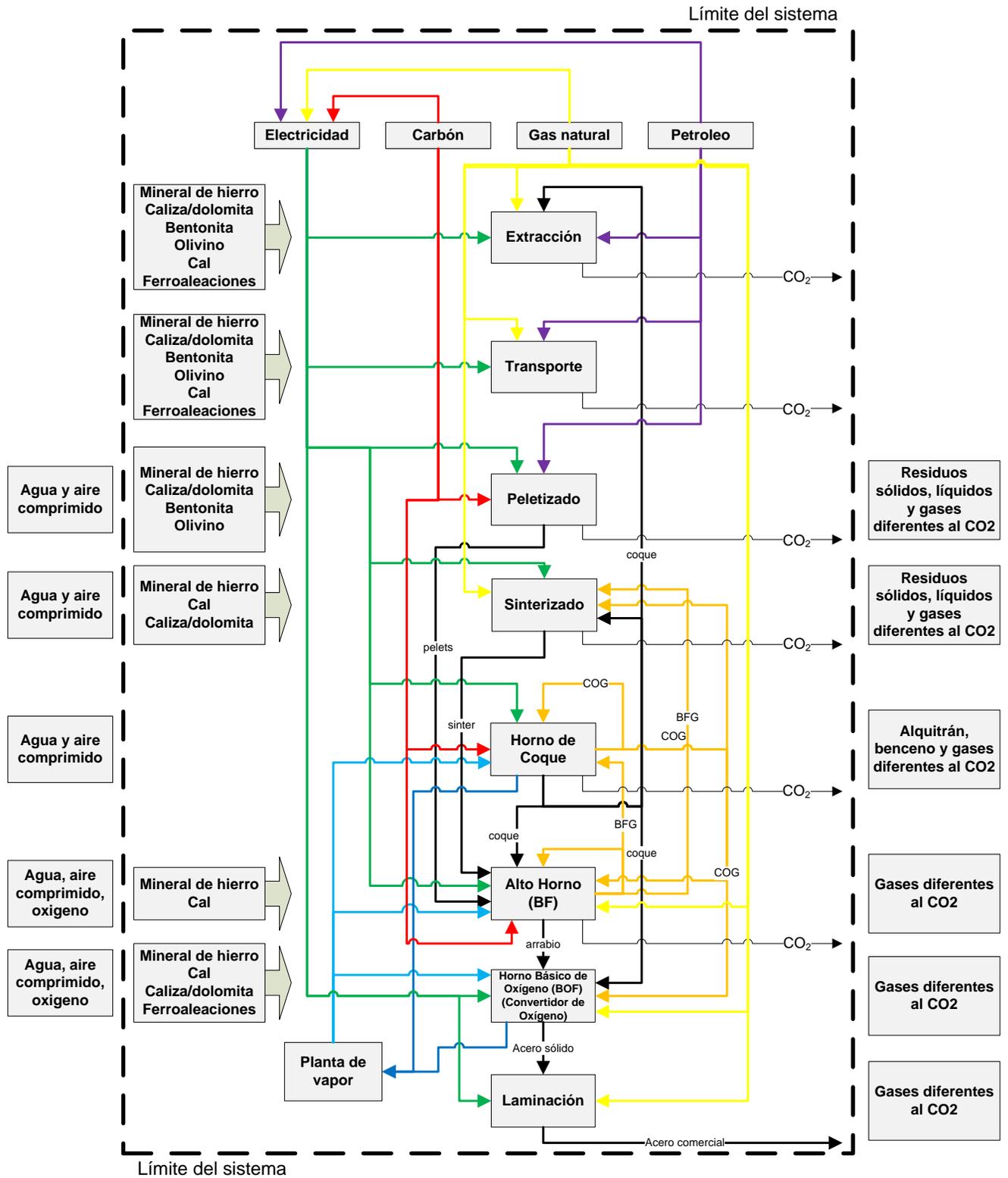
Tecnología BF+BOF (entradas y salidas)

- En los procesos de peletización y sinterizado, no se incluyen materiales auxiliares como los aditivos, ni productos secundarios no energéticos como materiales reciclados o desechos sólidos de procesos.
- En la elaboración de coque, se consideran los productos secundarios Gas de Horno de Coque (COG, por sus siglas en inglés), Gas de Alto Horno (BFG, por sus siglas en inglés) y vapor.
- Se sustraen de los límites del sistema de producción de arrabio en el alto horno: los materiales reciclados, plásticos y oxígeno.
- No se consideran dentro del proceso de BOF, desechos sólidos de procesos, ni oxígeno. El acero sólido que se genera como producto, incluye el total de: planchón, tocho, palanquilla y redondo para tubos, producidos por el método de colada continua.
- El proceso final de la producción de acero es el laminado, donde el acero sólido proveniente del BOF se transforma en productos terminados y semiterminados comerciales.

Tecnología DRI+EAF (entradas y salidas)

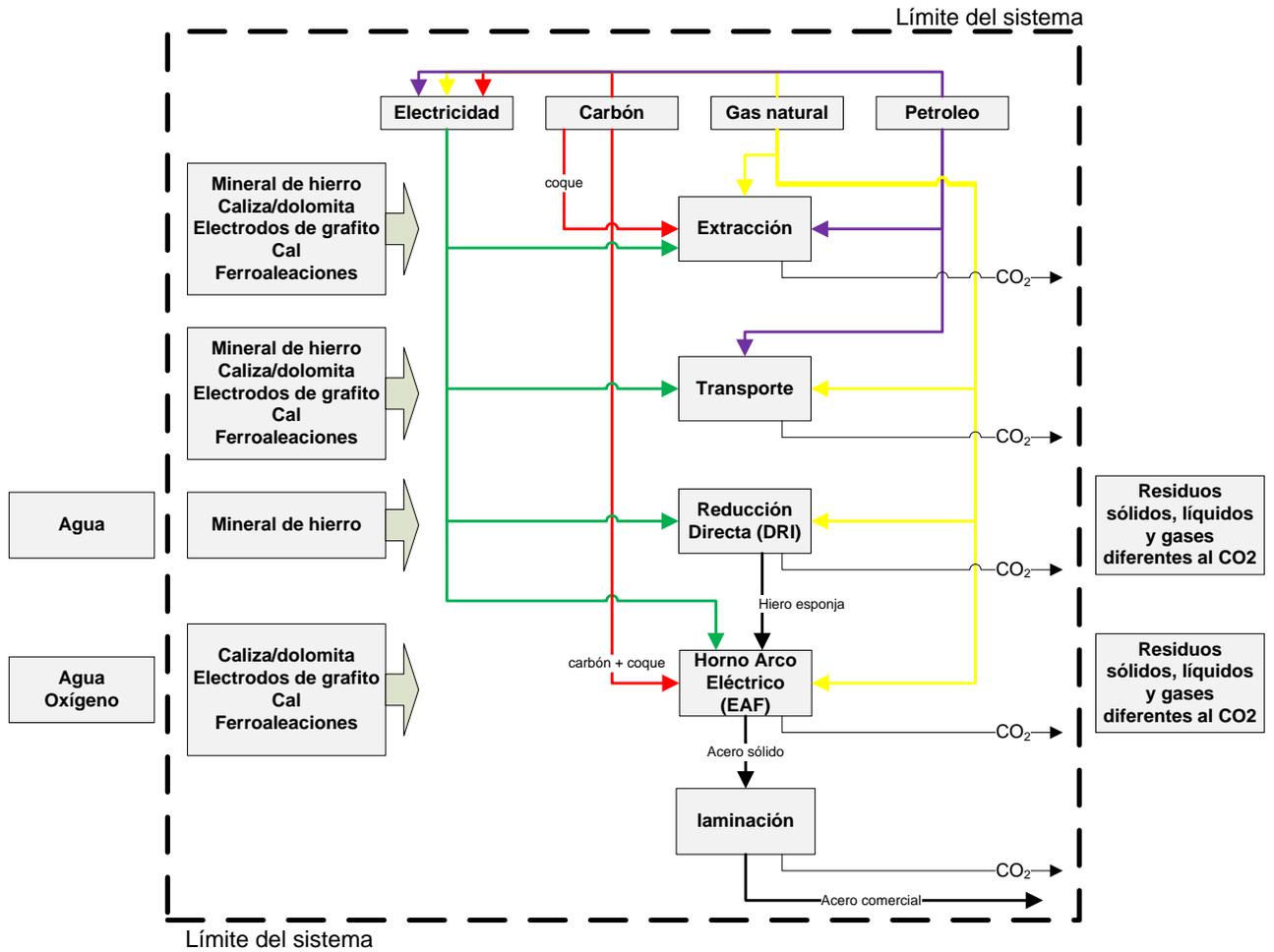
- De acuerdo con el IPPC (2008: VIII, 425), aproximadamente el 92% de la producción de acero DRI, utiliza como combustible el gas natural. En un limitado número de lugares, el carbón es usado como combustible. Por lo anterior, solo se considera como combustible para producción energía al gas natural. En la producción de hierro esponja suele utilizarse mineral de hierro y pelets, sin embargo, no se cuenta con información suficiente de las cantidades con que ambos materiales participan en el proceso. En el proceso de EAF, no se considera la producción de los productos auxiliares electrodos de grafito y ferroaleaciones. El proceso final de la producción de acero es el laminado, donde el acero sólido proveniente del EAF se transforma en productos terminados y semiterminados comerciales.

Figura 11. Flujos de entrada y salida en los procesos de la tecnología BF+BOF



Fuente: Elaboración propia con información del IPCC (2001); IPCC (2008) e IPCC (2006).

Figura 12. Flujos de entrada y salida en los procesos de la tecnología DRI+EAF



Fuente: Elaboración propia con información del IPCC (2001); IPCC (2008) e IPCC (2006).

4.2. Análisis del Inventario

4.2.1. Cálculos preliminares

Previo al cálculo de cantidades de energía y emisiones de CO₂ de los diferentes procesos de producción de acero, se calculó el factor de emisión de CO₂ por megajoule de los siguientes procesos complementarios: 1) Electricidad, 2) Extracción de materiales en mina, y 3) del Transporte de carga, diferenciado en automotriz y ferroviario. La cantidad de combustibles fósiles requeridos en estas actividades se consultó en el Balance Nacional de Energía 2006.

4.2.1.1. Cálculo de factor de emisión de CO₂ de producción de electricidad

Para la realización del presente cálculo (Tabla 6), se utiliza la información del Balance Nacional de Energía 2006, (SENER, 2007: Diagrama 2a y 6a, p. 61 y 69 respectivamente) relacionada con los combustibles fósiles para producir energía eléctrica y las fuentes de energía renovable que aportan a la producción de la misma. Los poderes caloríficos y factores de emisión por defecto para la combustión de los combustibles que se utilizan, fueron consultados en las Directrices del IPCC de 2006 (IPCC, 2006: II, Cuadros 1.2 y 1.4).

De manera general, se siguió el siguiente procedimiento:

- Se identificaron, tipo y cantidad de combustibles fósiles utilizados en la generación de energía eléctrica para el año 2006, así como la cantidad de megajoules aportados por fuentes de energía de origen renovable para la producción de electricidad.
- Con base en el poder calorífico y factores de emisión de los combustibles fósiles identificados, se estimó el total de emisiones de CO₂ generadas.
- Se determinó el factor de emisión de CO₂ de la producción de electricidad, por medio de división del total de CO₂ entre el total de megajoules utilizados.

Tabla 6. Producción de energía eléctrica

	2006	poder calorífico	factor	2006	factor
	MJ	MJ/t	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂	kg CO ₂ /t
Carbón	317,097,000,000	22,187	0.0946	29,997,376,200	2,099
Diésel	14,436,000,000	5,426	0.0741	1,069,707,600	402
Combustóleo	501,373,000,000	6,019	0.0741	37,151,739,300	446
Gas seco	775,748,000,000	33,913	0.0561	43,519,462,800	1,903
Uranio	119,419,000,000	-	-	-	-
Hidroenergía	303,550,000,000	-	-	-	-
Geoenergía	66,960,000,000	-	-	-	-
Eólica	451,000,000	-	-	-	-

total: 2,099,034,000,000

111,738,285,900

Factor de emisión: 0.0532 kg de CO₂/MJ

4.2.1.2. Cálculo de factores de emisión de CO₂ de extracción en minas

Los datos de los combustibles utilizados y sus cantidades de energía, se obtuvieron del Balance Nacional de Energía (SENER, 2007). Con base en el Anuario Estadístico de Minería Mexicana Ampliada 2007 (SE-CGM, II, Tabla 7), se determinó el volumen total de productos extraídos en 2006, el cual se relacionó con la cantidad de CO₂ emitido por el sector en el mismo año. En la estimación de emisiones a partir de los combustibles se utilizó el procedimiento ya mencionado en el punto anterior.

Tabla 7. Extracción minera

	2006	poder calorífico	factor	2006	factor
	MJ	MJ/t	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂	kg CO ₂ /t
Coque de carbón	5,791,000,000	26,521	0.0946	547,828,600	2,509
Gas licuado	2,471,000,000	47,300	0.0631	155,920,100	2,985
Diesel	4,269,000,000	43,000	0.0741	316,332,900	3,186
Combustóleo	5,712,000,000	43,000	0.0741	423,259,200	3,186
Gas seco	30,596,000,000	48,000	0.0561	1,716,435,600	2,693
Electricidad	19,942,000,000		0.0532 ¹⁾	1,061,576,372	-

total: 68,781,000,000

4,221,352,772

¹⁾ Factor de emisión de CO₂ calculado en la Tabla anterior de producción de energía eléctrica.

Producción total minera en 2006 (toneladas): 325,782,398.02
Factor de emisión por tonelada producida (kg CO₂/t): 12.96
MJ/t: 211.13

Factor de emisión: 0.0614 kg de CO₂/MJ

4.2.1.3. Cálculo de factores de emisión de CO₂ de autotransporte de carga

De manera general se siguió el siguiente procedimiento para el cálculo de la Tabla 8 y 9:

- Con base en la cantidad y tipo de combustibles fósiles utilizados (SENER, 2007), se estimó el total de emisiones de este sector.
- Con información de (INEGI, 2004: V, Cuadro RTNAP 11), se identificó la cantidad de toneladas transportadas y kilómetros totales recorridos por el sector autotransporte de carga.
- Se relacionaron datos del mismo año (2003) para obtener diversos factores.

Tabla 8. Autotransporte de carga

	2003	poder calorífico	factor	2003	factor
	MJ	MJ/t	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂	kg CO ₂ /t
Gas licuado	57,187,000,000	47,300	0.0631	3,608,499,700	2,985
Gasolinas	1,064,594,000,000	44,300	0.0693	73,776,364,200	3,070
Diesel	395,618,000,000	43,000	0.0741	29,315,293,800	3,186
Gas natural	698,000,000	48,000	0.0561	39,157,800	2,693

total:	1,518,097,000,000	106,739,315,500
---------------	--------------------------	------------------------

Toneladas transportadas autotransporte de carga (2003):	774,433,164
kilómetros recorridos:	9,686,428,036
km/t:	12.508
t/km:	0.080
MJ/t:	1,960.27
MJ/km:	156.72
kg CO ₂ /t:	137.83
kg CO ₂ /km:	11.02
Promedio de toneladas transportadas por tierra:	84%

Factor de emisión:	0.0703 kg de CO₂/MJ
---------------------------	---------------------------------------

4.2.1.4. Cálculo de factores de emisión de CO₂ de transporte ferroviario

Para la obtención de los datos, se siguió el procedimiento descrito en la sección anterior. Se considera, de acuerdo con la SCT (2003), que prácticamente el 100% del transporte vía ferrocarril es transporte de carga (no existe transporte de pasajeros).

Tabla 9. Transporte ferroviario

	2003	poder calorífico	factor	2003	factor
	MJ	MJ/t	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂	kg CO ₂ /t
Diesel	21,864,000,000	43,000	0.0741	1,620,122,400	3,186
Electricidad	131,000,000	-	0.0532 ¹⁾	6,973,549	-

total:	21,995,000,000			1,627,095,949	
---------------	-----------------------	--	--	----------------------	--

¹⁾ Factor de emisión de CO₂ calculado en la Tabla anterior de producción de energía eléctrica.

Toneladas transportadas en tren (2003):	103,671,519
kilómetros recorridos:	62,920,952
km/t:	0.607
t/km:	1.648
MJ/t:	212.16
MJ/km:	349.57
kg CO₂/t:	15.69
kg CO₂/km:	25.86
Promedio de toneladas transportadas por tierra:	16%

Factor de emisión:	0.0740 kg de CO₂/MJ
---------------------------	---------------------------------------

4.2.1.5. Calidad de los datos utilizados

- Directrices del IPCC 2006, del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2006). Las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero fueron concebidas específicamente para que los países elaboren y declaren los inventarios de gases de efecto invernadero en virtud del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).
 - *Antigüedad de datos: validados para su utilización en 2006.*
 - *Geografía: Datos por defecto sugeridos en el plano internacional.*
 - *Tecnología: Datos mixtos, ya que en sus análisis incorpora tecnologías que van desde las anticuadas hasta las mejores disponibles en el momento.*
 - *Representatividad: Promedio de procesos con salidas similares.*

- Balance Nacional de Energía 2006, de la Secretaría Nacional de Energía (SENER, 2007). Presenta estadísticas nacionales sobre el origen y destino de la energía primaria y secundaria en México durante el año 2006.

- *Antigüedad de datos: 2006.*
- *Geografía: Datos nacionales.*
- *Tecnología: Datos mixtos.*
- *Representatividad: Promedio de procesos con salidas similares.*

- *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana Ampliada 2007* de la Secretaría de Economía y la Coordinación General Minera (SE-CGM, 2008). Presenta indicadores básicos de la minería, de la producción minero-metalúrgica, el comercio exterior, estadísticas de productos metálicos y no metálicos, datos de la industria siderúrgica y de la inversión extranjera en México.
 - *Antigüedad de datos: 2003-2007*
 - *Geografía: Datos nacionales.*
 - *Tecnología: Datos mixtos.*
 - *Representatividad: Promedio de procesos con salidas similares.*

- *Censos Económicos 2004* del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2004). Información estadística de las actividades de pesca, minería, electricidad, gas, agua, construcción, manufacturas, comercio, servicios y transportes, que operaron durante el año 2003.
 - *Antigüedad de datos: 2003*
 - *Geografía: Datos nacionales.*
 - *Tecnología: Datos mixtos.*
 - *Representatividad: Promedio de procesos con salidas similares.*

- *Estadísticas Básicas 2005* de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2005). Presenta información estadística del autotransporte federal y ferroviario, del servicio privado, de servicios auxiliares y de la infraestructura carretera.
 - *Antigüedad de datos: 2005*
 - *Geografía: Datos nacionales.*
 - *Tecnología: Datos mixtos.*
 - *Representatividad: Promedio de procesos con salidas similares.*

4.2.2. Cálculo de procesos unitarios

La dimensión del trabajo y las limitantes de recursos que se tienen, impiden la obtención de información con origen en la medición directa de consumos en la industria siderúrgica nacional. Tampoco se cuenta con suficiente información nacional publicada de consumos de materiales, energía y productos de la industria siderúrgica. Por lo anterior, la información utilizada en el presente análisis, proviene de fuentes bibliográficas nacionales e internacionales. Para la determinación de las cantidades presentadas en las Tablas 10 y 11, se procedió de la siguiente manera:

- Se tomaron como base consumos típicos de la información presentada en los documentos: *Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel*, del IPPC (2001: III, IV, V, VI, VII, VIII) y (2008: IV).
- Se buscaron valores nacionales que pudieran aplicarse y sustituyeran a los iniciales.
- Se buscaron otras fuentes locales (específicas de alguna empresa) para completar faltantes.

Tabla 10. Flujos de entrada y salida. Tecnología BF+BOF.

Peletización					
Entradas				Salidas	
Material	Kg/t pelet	Energía	MJ/t pelet	Producto	Unidades
Mineral de hierro	1028	Carbón	241	Pelet	1000 kg
Caliza/dolomita	31	Petróleo	104.5		
Bentonita	6.2	Electricidad	89.5		
Olivino	33.4				
Sinterizado					
Entradas				Salidas	
Materiales	Kg/t sinter	Energía	MJ/t sinter	Producto	Unidades
Mineral de hierro	765	COG	97	Sinter	1000 kg
Cal	7.3	Coque	1166 (1)		
Caliza/dolomita	147.5	Electricidad	389		

Horno de coque					
Entradas				Salidas	
Materiales	Kg/t coque	Energía	MJ/t coque	Productos y emisiones	
Carbón	1300	COG	1194 (1)	Coque	1000 kg
		BFG	2090 (1)	COG	8358 MJ (1)
		Electricidad	597 (1)	Vapor	295 MJ
		Vapor	299 (1)	Electricidad	896 MJ (1)
Alto Horno (BF)					
Entradas				Salidas	
Material	Kg/t arrabio	Energía	MJ/t arrabio	Producto	Unidades
Sinter	1034	BFG	1330	Arrabio	1000 kg
Mineral de hierro	188	COG	605 (1)	BFG	4595 MJ
Pelets	1391 (1)	Electricidad	242 (1)		
Coque	462 (3)	Vapor	846		
Carbón	158 (1)				
Cal	5				
Horno Básico de Oxígeno (BOF)					
Entradas				Salidas	
Material	Kg/t	Energía	MJ/t	Producto	Unidades
Arrabio	970 (3)	COG	100 (1)	Acero sólido	1000 kg
Cal	42.5	Electricidad	300 (1)	Vapor	145 MJ
Caliza/dolomita	2.8	Vapor	100 (1)		
Ferroaleaciones	6				
Laminación (1)					
Entradas				Salidas	
Materiales	Kg/t	Energía	MJ/t	Producto	Unidades
Acero sólido	1177	COG	1695	Acero comercial	1000 kg
		BFG	565		
		Vapor	226		
		Electricidad	2600		

- (1). Fuente: (IPPC, 2001: III, 21); (2). Fuente: (IPPC, 2008: VIII); (3). Fuente: (INE-SEMARNAT, 2006); (4). Fuente: HYL en: http://www.hylsamex.com.mx/hyl/hyl_ps_hyltech_proceso_c.htm.
(5). Dato con alto grado de incertidumbre; Fuente de datos no señalados: (IPPC, 2001: IV, V, VI, VII y VIII).

COG: Gas de horno de coque; BFG: Gas de alto horno; DRI: Reducción directa de acero; EAF: Horno de Arco Eléctrico. MJ: Megajoules. Igual a un millón de Joules³⁰.

³⁰ 1 Joule es la cantidad de energía que se utiliza para mover un kilogramo masa a lo largo de una distancia de un metro, aplicando una aceleración de un metro por segundo al cuadrado (SENER, 2007).

Tabla 11. Flujos de entrada y salida. Tecnología DRI+EAF.

Reducción Directa (DRI)					
Entradas				Salidas	
Material	Kg/t	Energía	MJ/t	Producto	Unidades
Mineral de hierro	1587 (5)	Gas natural	10136 (4)	Hierro esponja	1000 kg
		Electricidad	227 (4)		
Horno de Arco Eléctrico (2)					
Entradas				Salidas	
Materiales	Kg/t	Energía	MJ/t	Producto	Unidades
carbón	14	Gas natural	1525	Acero sólido	1000 kg
Hierro esponja	479 (3)	Electricidad	2139		
Cal	60				
Caliza/dolomita	12.3				
Coque (1)	17.4				
Electrodos grafito	4				
Ferroaleaciones	20.2				
Laminación (1)					
Entradas				Salidas	
Materiales	Kg/t	Energía	MJ/t	Producto	Unidades
Acero sólido	1177	Gas natural	2300	Acero comercial	1000 kg
		Electricidad	2600		

(1). Fuente: (IPPC, 2001: III, 21); (2). Fuente: (IPPC, 2008: VIII); (3). Fuente: (INE-SEMARNAT, 2006); (4). Fuente: HYL en: http://www.hylsamex.com.mx/hyl/hyl_ps_hyltech_proceso_c.htm.
(5). Dato con alto grado de incertidumbre; Fuente de datos no señalados: (IPPC, 2001: IV, V, VI, VII y VIII).

COG: Gas de horno de coque; BFG: Gas de alto horno; DRI: Reducción directa de acero; EAF: Horno de Arco Eléctrico. MJ: Megajoules. Igual a un millón de Joules.

4.2.2.1. Cálculo de procesos individuales

Con los factores de emisión de electricidad, extracción de minerales y transporte de carga, y las cantidades de los flujos de entrada y salida, se estimaron las emisiones de CO₂ relacionadas para cada uno de los procesos, considerando 1000 kg de producción.

- Para la especificación del poder calorífico de los materiales utilizados, se utilizaron dos fuentes: el Balance Nacional de Energía 2006 (SENER, 2007) y las Directrices del IPCC de 2006 (IPCC, 2006).
- Las emisiones de CO₂ se calcularon usando los factores de emisión por defecto de las Directrices del IPCC de 2006, ya que no se cuenta con datos medidos directamente en las fábricas, ni datos publicados de emisiones en el país.

En las Tablas 12 y 13 que se presentan a continuación, se analizan las etapas de Extracción de materiales y Producción del acero, y se determina para cada una de ellas, la cantidad de emisiones de CO₂ de los materiales y energía utilizados.

Con relación al transporte de materias primas, las plantas de peletización en México normalmente se encuentran en el sitio de la mina, por lo que se utiliza el transporte de carga para enviarlos, de la mina a la planta industrial. Las toneladas de materiales a considerar en el transporte de carga corresponden con las cantidades de materiales extraídos de las minas. Sin embargo, de acuerdo con los datos calculados para el periodo 1995-2005 con información de las Estadísticas Básicas 2005 de la SCT (2005: Cuadro 8.1.1), el promedio de carga transportada por autotransporte es de 84%, y la transportada por ferrocarril es de 16%. Por lo anterior, el volumen de cada material es analizado por cada uno de los dos factores en su debida proporción (Tabla 14 y 15).

Tabla 12. Procesos individuales para Extracción de minas y Producción. Tecnología (BF+BOF).

Peletización: 1000 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total	
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t p	
Carbón	241.00	MJ	11	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	22.8	
Petróleo	104.50	MJ	2	kg	42,300	MJ/t	73,300	0.0733	7.7	
Electricidad	89.50	MJ	9	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	4.8	
total energía de entrada: 435.00 MJ/t p									CO₂: 35.2	
kg CO₂/MJ pelet: 0.08										
Entradas de materiales			volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO ₂			
Mineral de hierro			1,028	kg	217.04	MJ/t	13.32		kg CO ₂ /t	
Caliza/dolomita			31	kg	6.54	MJ/t	0.40		kg CO ₂ /t	
Bentonita			6	kg	1.31	MJ/t	0.08		kg CO ₂ /t	
Olivino			33	kg	7.05	MJ/t	0.43		kg CO ₂ /t	
totales:			1,099	kg/t p	231.94	MJ/t p	14.24		kg CO₂/t p	
Salida de productos y coproductos			volúmenes							
Pelet			1,000	kg						

Sinterizado: 1000 kg

Entrada de Energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total	
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t s	
COG	97.00	MJ	3	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	4.3	
Coque	1,166.00	MJ	44	kg	26,521	MJ/t	107,000	0.1070	124.8	
Electricidad	389.00	MJ	37	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	20.7	
total energía de entrada: 1,652.00 MJ/t s									CO₂: 149.8	
kg CO₂/MJ sinter: 0.09										
Entradas de materiales			volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO ₂			
Mineral de hierro			765	kg	161.51	MJ/t	9.91		kg CO ₂ /t	
Cal			7	kg	1.54	MJ/t	0.09		kg CO ₂ /t	
Caliza/dolomita			148	kg	31.14	MJ/t	1.91		kg CO ₂ /t	
totales:			920	kg/t s	194.19	MJ/t s	11.92		kg CO₂/t s	
Salidas de productos y coproductos			volúmenes							
Sinter			1,000	kg						

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SUSTENTABILIDAD DEL ACERO
Energía incorporada y emisiones de CO₂ en la edificación

Horno de coque: 1000 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t c
COG	1,194.00	MJ	31	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	53.0
BFG	2,090.00	MJ	846	kg	2,470	MJ/t	260,000	0.2600	543.4
Electricidad	597.00	MJ	58	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	31.8
Carbón	28,843.10	MJ	1,300	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	2,728.6
Vapor	299.00	MJ							
total energía de entrada:			33,023.10	MJ/t c				CO₂:	3,356.8
kg CO₂/MJ coque:			0.10						
Entrada de materiales									
Salidas de productos y coproductos			volúmenes						
Coque			1,000	kg					
COG	8,358.00	MJ							
electricidad	896.00	MJ							
benceno y alquitrán	2,687.00	MJ							

Alto Horno (BF): 1000 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t a
BFG	1,330.00	MJ	538	kg	2,470	MJ/t	260,000	0.2600	345.8
COG	605.00	MJ	16	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	26.9
Electricidad	242.00	MJ	23	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	12.9
Carbón	3,507.00	MJ	158	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	331.8
Coque	15,256.67	MJ	462	kg					1,550.8
Pelets	605.00	MJ	1,391	kg					49.0
Sinter	1,708.85	MJ	1,034	kg					154.9
Vapor	846.00	MJ							
total energía de entrada:			24,100.52	MJ/t a				CO₂:	2,472.0
kg CO₂/MJ arrabio:			0.10						
Entrada de materiales			volúmenes	energía en extracción		emisiones de CO₂			
Mineral de hierro			188	kg	39.59	MJ/t		2.43	kg CO ₂ /t
Cal			5	kg	1.06	MJ/t		0.06	kg CO ₂ /t
totales:			193	kg/t a	40.64	MJ/t a	2.49		kg CO₂/t a
Salidas de productos y coproductos			volúmenes						
Arrabio			1,000	kg					
BFG	4,595	MJ							

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SUSTENTABILIDAD DEL ACERO
Energía incorporada y emisiones de CO₂ en la edificación

Horno Básico de Oxígeno (BOF): 1000 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t as
COG	100.00	MJ	3	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	4.4
Electricidad	300.00	MJ	29	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	16.0
arrabio	23,377.50	MJ	970	kg					2,397.9
Vapor	100.00	MJ							
total energía de entrada:			23,877.50	MJ/t as				CO₂:	2,418.3
kg CO₂/MJ acero sólido:			0.10						
Entradas de materiales			volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO ₂		
Cal			43	kg	8.97	MJ/t		0.55	kg CO ₂ /t
Caliza/dolomita			3	kg	0.59	MJ/t		0.04	kg CO ₂ /t
Ferroaleaciones			6	kg	1.27	MJ/t		0.08	kg CO ₂ /t
totales:			51	kg/t as	10.83	MJ/t as			0.66 kg CO₂/as
Salidas de productos y coproductos			volúmenes						
Acero sólido			1,000	kg					
Vapor	700.00	MJ							

Laminación: 1000 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t ac
COG	1,695.00	MJ	44	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	75.3
BFG	565.00	MJ	229	kg	2,470	MJ/t	260,000	0.2600	146.9
Electricidad	2,599.00	MJ	250	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	138.4
Acero sólido	28,103.82	MJ	1,177	kg					2,846.3
Vapor	226.00	MJ							
total energía de entrada:			33,188.82	MJ/t ac				CO₂:	3,206.8
kg CO₂/MJ acero comercial:			0.10						
Entrada de materiales			volúmenes						
Salidas de productos y coproductos			volúmenes						
Acero comercial			1,000	kg					

Simbología: COG Gas de Horno de Coque c coque
 BFG Gas de Alto Horno a arrabio
 p pelet as acero sólido
 s sinter ac acero comercial

Nota: Para el cálculo de la energía en extracción y emisiones de CO₂, se consideran los siguientes factores determinados anteriormente, en el apartado de cálculos preliminares de Extracción de materiales: 211.13 MJ/ton y 12.96 kg de CO/ton

Tabla 13. Procesos individuales para Extracción de minas y Producción. Tecnología (DRI+EAF)

Reducción Directa (DRI): 1000 kg									
Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t he
Gas natural	10,136.00	MJ	211	kg	48,000	MJ/t	56,100	0.0561	568.6
Electricidad	227.00	MJ	22	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	12.1
total energía de entrada:			10,363.00 MJ/t he				CO₂:		580.7
kg CO₂/MJ hierro esponja:			0.06						
Entrada de materiales			volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO ₂		
Mineral de hierro			1,587	kg	335.06	MJ/t		20.56	kg CO ₂ /t
totales:			1,587	kg/t he	335.06	MJ/t he		20.56	kg CO₂/t he
Salidas de productos			volúmenes						
Hierro esponja			1,000	kg					

Horno de Arco Eléctrico (EAF): 1000 kg									
Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t as
Gas natural	1,525.00	MJ	32	kg	48,000	MJ/t	56,100	0.0561	85.6
Electricidad	2,139.00	MJ	206	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	113.9
Carbón	311.00	MJ	14	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	29.4
Hierro esponja	4,963.88	MJ	479	kg					278.2
total energía de entrada:			8,938.88 MJ/t as				CO₂:		507.0
kg CO₂/MJ acoso sólido:			0.06						
Entrada de materiales			volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO ₂		
cal			60	kg	12.67	MJ/t		0.78	kg CO ₂ /t
Caliza/dolomita			12	kg	2.60	MJ/t		0.16	kg CO ₂ /t
Electrodos grafito			4	kg	0.84	MJ/t		0.05	kg CO ₂ /t
Ferroaleaciones			20	kg	4.26	MJ/t		0.26	kg CO ₂ /t
totales:			97	kg/t as	20.37	MJ/t as		1.25	kg CO₂/t as
Salidas de productos			volúmenes						
Acero sólido			1,000	kg					

Laminación: 1000 kg									
Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor		total
							kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /t ac
Gas natural	2,300.00	MJ/t ac	48	kg	48,000	MJ/t	56,100	0.0561	129.0
Electricidad	2,600.00	MJ/t ac	250	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	138.4
Acero sólido	10,521.06	MJ/t ac	1,177	kg					596.7
total energía de entrada:			15,421.06 MJ/t ac				CO₂:		864.2
kg CO₂/MJ acero comercial:			0.06						
Entradas de materiales			volúmenes						
Salidas de productos			volúmenes						
Acero comercial			1,000	kg					

Simbología: he hierro esponja
as acero sólido
ac acero comercial

Nota: Para el cálculo de la energía en extracción y emisiones de CO₂, se consideran los siguientes factores determinados anteriormente, en el apartado de cálculos preliminares de Extracción de materiales: 211.13 MJ/ton y 13.96 kg de CO/ton

**Tabla 14. Procesos individuales para Transporte de carga.
Tecnología (BF+BOF)**

Peletización: 1000 kg

Entradas de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t p	kg CO ₂ /t p	MJ/t p	kg CO ₂ /t p	MJ/t p	kg CO ₂ /t p
Mineral de hierro	1,028	kg	1,692.73	119.02	34.90	2.58	1,727.63	121.60
Caliza/dolomita	31	kg	51.05	3.59	1.05	0.08	52.10	3.67
Bentonita	6	kg	10.21	0.72	0.21	0.02	10.42	0.73
Olivino	33	kg	55.00	3.87	1.13	0.08	56.13	3.95
Pelet	1,000	kg	1,646.63	115.78	33.95	2.51	1,680.57	118.29
totales:	2,099	kg/t p	1,808.98	127.19	37.29	2.76	1,846.28	129.95

Sinterizado: 1000 kg

Entradas de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t s	kg CO ₂ /t s	MJ/t s	kg CO ₂ /t s	MJ/t s	kg CO ₂ /t s
Mineral de hierro	765	kg	12.02	0.85	0.25	0.02	12.27	0.86
Cal	7	kg	242.88	17.08	5.01	0.37	247.88	17.45
Caliza/dolomita	148	kg	1,514.57	106.49	31.22	2.31	1,545.79	108.80
totales:	920	kg/t s	1,769.46	124.41	36.48	2.70	1,805.94	127.11

Alto Horno (BF): 1000 kg

Entrada de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t a	kg CO ₂ /t a	MJ/t a	kg CO ₂ /t a	MJ/t a	kg CO ₂ /t a
Mineral de hierro	188	kg	8.23	0.58	0.17	0.01	8.40	0.59
Cal	5	kg	316.98	22.29	6.53	0.48	323.51	22.77
totales:	193	kg/t a	325.21	22.87	6.70	0.50	331.91	23.36

Horno Básico de Oxígeno (BOF): 1000 kg

Entradas de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t as	kg CO ₂ /t as	MJ/t as	kg CO ₂ /t as	MJ/t as	kg CO ₂ /t as
Cal	43	kg	4.61	0.32	0.10	0.01	4.71	0.33
Caliza/dolomita	3	kg	9.88	0.69	0.20	0.02	10.08	0.71
Ferroaleaciones	6	kg	84.47	5.94	1.74	0.13	86.21	6.07
totales:	51	kg/t as	98.96	6.96	2.04	0.15	101.00	7.11

Simbología: p pelet
s sinter
a arrabio
as acero sólido

Nota: Para el cálculo de la energía y emisiones de CO₂, se consideran los siguientes factores determinados anteriormente, en el apartado de Cálculos Preliminares de Transporte: 1960.27 MJ/ton; 137.83 kg de CO₂/ton y 84% de promedio de toneladas transportadas en autotransporte de carga. 212.26 MJ/ton; 15.69 kg de CO₂/ton y 16% de promedio de toneladas transportadas por el sector ferroviario.

**Tabla 15. Procesos individuales para Transporte de carga.
Tecnología (DRI+EAF)**

Reducción Directa (DRI): 1000 kg

Entrada de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t he	kg CO ₂ /t he	MJ/t he	kg CO ₂ /t he	MJ/t he	kg CO ₂ /t he
Mineral de hierro	1,587	kg	2,613.19	183.74	53.87	3.99	2,667.07	187.72
totales:	1,587	kg/t he	2,613.19	183.74	53.87	3.99	2,667.07	187.72

Horno de Arco Eléctrico (EAF): 1000 kg

Entrada de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t as	kg CO ₂ /t as	MJ/t as	kg CO ₂ /t as	MJ/t as	kg CO ₂ /t as
cal	60	kg	20.25	1.42	0.42	0.03	20.67	1.45
Caliza/dolomita	12	kg	6.59	0.46	0.14	0.01	6.72	0.47
Electrodos grafito	4	kg	33.26	2.34	0.69	0.05	33.95	2.39
Ferroaleaciones	20	kg	158.90	11.17	3.28	0.24	162.18	11.41
totales:	97	kg/t as	219.00	15.40	4.51	0.33	223.52	15.73

Simbología: he hierro esponja
as acero sólido

Nota: Para el cálculo de la energía y emisiones de CO₂, se consideran los siguientes factores determinados anteriormente, en el apartado de Cálculos Preliminares de Transporte: 1960.27 MJ/ton; 137.83 kg de CO₂/ton y 84% de promedio de toneladas transportadas en autotransporte de carga. 212.26 MJ/ton; 15.69 kg de CO₂/ton y 16% de promedio de toneladas transportadas por el sector ferroviario.

4.2.2.2. Cálculo de procesos del sistema

Con las cantidades de los flujos de entrada y salida ya identificados (Tablas 10 y 11), y con los cálculos realizados de los procesos unitarios individuales para las etapas de Extracción de materiales, Transporte y Producción (Tablas 12 a 15) se determinan las cantidades de emisiones de CO₂ del sistema del material, en el que se analiza la producción de una tonelada de acero comercial (unidad funcional). La metodología utilizada para el cálculo, es la recomendada por las Directrices del IPCC (2006), comentada en el apartado de Cálculos preliminares.

**Tabla 16. Procesos del sistema para Extracción de materiales.
Tecnología (BF+BOF)**

Peletización: 1589 kg

Entradas de materiales	volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO2		
Mineral de hierro	1,633	kg	344.87	MJ	21.17	kg CO2	
Caliza/dolomita	49	kg	10.40	MJ	0.64	kg CO2	
Bentonita	10	kg	2.08	MJ	0.13	kg CO2	
Olivino	53	kg	11.20	MJ	0.69	kg CO2	
totales:		1,746	kg/t ac	368.56	MJ/t ac	22.62	kg CO2/t ac
Promedio de participación de volúmenes, energía y CO2 emitido:		56.1%					

Sinterizado: 1181 kg

Entradas de materiales	volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO2		
Mineral de hierro	903	kg	190.74	MJ	11.71	kg CO2	
Cal	9	kg	1.82	MJ	0.11	kg CO2	
Caliza/dolomita	174	kg	36.78	MJ	2.26	kg CO2	
totales:		1,086	kg/t ac	229.34	MJ/t ac	14.08	kg CO2/t ac
Promedio de participación de volúmenes, energía y CO2 emitido:		34.9%					

Alto Horno (BF): 1,142 kg

Entrada de materiales	volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO2		
Mineral de hierro	214	kg	45.21	MJ	2.77	kg CO2	
Cal	6	kg	1.21	MJ	0.07	kg CO2	
totales:		220	kg/t ac	46.41	MJ/t ac	2.85	kg CO2/t ac
Promedio de participación de volúmenes, energía y CO2 emitido:		7.1%					

Horno Básico de Oxígeno (BOF): 1,177 kg

Entradas de materiales	volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO2		
Cal	50	kg	10.56	MJ	0.65	kg CO2	
Caliza/dolomita	3	kg	0.70	MJ	0.04	kg CO2	
Ferroaleaciones	7	kg	1.49	MJ	0.09	kg CO2	
totales:		60	kg/t ac	12.75	MJ/t ac	0.78	kg CO2/t ac
Promedio de participación de volúmenes, energía y CO2 emitido:		1.9%					

Totales por 1000 kg de acero comercial:	volúmenes		energía		emisiones de CO2	
	3,112.17	kg	657.06	MJ	40.33	kg CO2

Simbología: ac acero comercial

**Tabla 17. Procesos del sistema para Extracción de materiales.
Tecnología (DRI+EAF)**

Reducción Directa (DRI): 479 kg

Entrada de materiales	volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO2		
Mineral de hierro	760	kg	160.49	MJ	9.85	kg CO2	
totales:		760	kg/t ac	160.49	MJ/t ac	9.85	kg CO2/t ac
Promedio de participación de volúmenes, energía y CO2 emitido:		87.0%					

Horno de Arco Eléctrico (EAF): 1,177 kg

Entrada de materiales	volúmenes		energía en extracción		emisiones de CO2		
cal	71	kg	14.91	MJ	0.92	kg CO2	
Caliza/dolomita	14	kg	3.06	MJ	0.19	kg CO2	
Electrodos grafito	5	kg	0.99	MJ	0.06	kg CO2	
Ferroaleaciones	24	kg	5.02	MJ	0.31	kg CO2	
totales:		114	kg/t ac	23.98	MJ/t ac	1.47	kg CO2/t ac
Promedio de participación de volúmenes, energía y CO2 emitido:		13.0%					

Totales por 1000 kg de acero comercial:	volúmenes		energía		emisiones de CO2	
	873.75	kg	184.47	MJ	11.32	kg CO2

Simbología: ac acero comercial

**Tabla 18. Procesos del sistema para Transporte de carga.
Tecnología (BF+BOF)**

Peletización: 1,589 kg

Entradas de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac
Mineral de hierro	1,633	kg	2,689.75	189.12	55.45	4.10	2,745.20	193.22
Caliza/dolomita	49	kg	81.11	5.70	1.67	0.12	82.78	5.83
Bentonita	10	kg	16.22	1.14	0.33	0.02	16.56	1.17
Olivino	53	kg	87.39	6.14	1.80	0.13	89.19	6.28
Pelet	1,589	kg	2,616.49	183.97	53.94	3.99	2,670.43	187.96
totales:	3,335	kg/t ac	2,874.47	202.11	59.26	4.38	2,933.73	206.49

70.9%

promedio de energía y CO2 emitido: 56.1%

Sinterizado: 1,181 kg

Entradas de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac
Mineral de hierro	903	kg	1,487.67	104.60	30.67	2.27	1,518.34	106.87
Cal	9	kg	14.20	1.00	0.29	0.02	14.49	1.02
Caliza/dolomita	174	kg	286.84	20.17	5.91	0.44	292.75	20.61
totales:	1,086	kg/t ac	1,788.70	125.77	36.87	2.73	1,825.58	128.49

23.1%

promedio de energía y CO2 emitido: 34.9%

Alto Horno (BF): 1,142 kg

Entrada de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac
Mineral de hierro	214	kg	352.58	24.79	7.27	0.54	359.85	25.33
Cal	6	kg	9.40	0.66	0.19	0.01	9.60	0.68
totales:	220	kg/t ac	361.99	25.45	7.46	0.55	369.45	26.00

4.7%

promedio de energía y CO2 emitido: 7.1%

Horno Básico de Oxígeno (BOF): 1,177 kg

Entradas de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac
Cal	50	kg	82.37	5.79	1.70	0.13	84.07	5.92
Caliza/dolomita	3	kg	5.43	0.38	0.11	0.01	5.54	0.39
Ferroaleaciones	7	kg	11.63	0.82	0.24	0.02	11.87	0.84
totales:	60	kg/t ac	99.42	6.99	2.05	0.15	101.47	7.14

Totales por 1000 kg de acero comercial:	volúmenes		autotransporte		tren		totales transporte de carga	
	kg		MJ	kg CO2	MJ	kg CO2	MJ	kg CO2
	4,701.17		5,124.59	360.32	105.64	7.82	5,230.23	368.13

Simbología:
p pelet
s sinter
a arrabio
as acero sólido
ac acero comercial

**Tabla 19. Procesos del sistema para Transporte de carga.
Tecnología (DRI+EAF)**

Reducción Directa (DRI): 479 kg

Entrada de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t he	kg CO2/t he	MJ/t he	kg CO2/t he	MJ/t he	kg CO2/t he
Mineral de hierro	760	kg	1,251.72	88.01	25.80	1.91	1,277.52	89.92
totales:	760	kg/t he	1,251.72	88.01	25.80	1.91	1,277.52	89.92

16.2%

promedio de energía y CO2 emitido: 87.0%

Horno de Arco Eléctrico (EAF): 1,177 kg

Entrada de materiales	volúmenes		autotransporte		tren		subtotales transporte de carga	
			MJ/t as	kg CO2/t as	MJ/t as	kg CO2/t as	MJ/t as	kg CO2/t as
cal	71	kg	116.28	8.18	2.40	0.18	118.68	8.35
Caliza/dolomita	14	kg	23.84	1.68	0.49	0.04	24.33	1.71
Electrodos grafito	5	kg	7.75	0.55	0.16	0.01	7.91	0.56
Ferroaleaciones	24	kg	39.15	2.75	0.81	0.06	39.96	2.81
totales:	114	kg/t as	187.02	13.15	3.86	0.29	190.88	13.44

2.4%

promedio de energía y CO2 emitido: 13.0%

Totales por 1000 kg de acero comercial:	volúmenes		autotransporte		tren		totales transporte de carga	
	kg		MJ	kg CO2	MJ	kg CO2	MJ	kg CO2
	873.75		1,438.74	101.16	29.66	2.19	1,468.41	103.35

Simbología: he hierro esponja
as acero sólido

Tabla 20. Procesos del sistema para Producción. Tecnología (BF+BOF)

Peletización: 1589 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
Carbón	382.95	MJ	17	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	36.2
Petróleo	166.05	MJ	4	kg	42,300	MJ/t	73,300	0.0733	12.2
Electricidad	142.22	MJ	14	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	7.6
total energía de entrada:			691.22 MJ/t ac			CO2:			56.0
participación en el proceso:			2.5%			participación en el proceso:			0.2%

Sinterizado: 1181 kg

Entrada de Energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
COG	114.56	MJ	3	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	5.1
Coque	1,377.05	MJ	52	kg	26,521	MJ/t	107,000	0.1070	147.3
Electricidad	459.41	MJ	44	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	24.5
total energía de entrada:			1,951.01 MJ/t ac			CO2:			176.9
participación en el proceso:			7.0%			participación en el proceso:			0.6%

Horno de coque: 368 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t c
COG	439.39	MJ	11	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	19.5
BFG	769.12	MJ	311	kg	2,470	MJ/t	260,000	0.2600	200.0
Electricidad	219.70	MJ	21	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	11.7
Carbón	10,614.26	MJ	478	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	1,004.1
Vapor	110.03	MJ							
total energía de entrada:			12,152.50 MJ/t ac			CO2:			1,235.3
participación en el proceso:			43.5%			participación en el proceso:			4.4%

Alto Horno (BF): 1,142 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
BFG	1,518.86	MJ	615	kg	2,470	MJ/t	260,000	0.2600	394.9
COG	690.91	MJ	18	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	30.7
Electricidad	276.36	MJ	27	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	14.7
Carbón	4,004.99	MJ	181	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	378.9
Coque			462	kg					
Pelets			1,391	kg					
Sinter			1,034	kg					
Vapor	966.13	MJ							
total energía de entrada:			7,457.26 MJ/t ac			CO2:			819.2
participación en el proceso:			26.7%			participación en el proceso:			2.9%

Horno Básico de Oxígeno (BOF): 1,177 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
COG	117.70	MJ	3	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	5.2
Electricidad	353.10	MJ	34	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	18.8
arrabio			1,177	kg					
Vapor	117.70	MJ							
total energía de entrada:			588.50 MJ/t ac			CO2:			24.0
participación en el proceso:			2.1%			participación en el proceso:			0.1%

Laminación: 1,000 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
COG	1,695.00	MJ	44	kg	38,700	MJ/t	44,400	0.0444	75.3
BFG	565.00	MJ	229	kg	2,470	MJ/t	260,000	0.2600	146.9
Electricidad	2,599.00	MJ	250	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	138.4
Acero sólido			1,000	kg					
Vapor	226.00	MJ							
total energía de entrada:			5,085.00 MJ/t ac			CO2:			360.5
participación en el proceso:			18.2%			participación en el proceso:			1.3%

Totales por tonelada de acero comercial (tecnología BF+BOF)

Energía de entrada (MJ):	27,925.49	Emisiones de CO2 (kg):	2,671.84
---------------------------------	------------------	-------------------------------	-----------------

Simbología: COG Gas de Horno de Coque c coque
 BFG Gas de Alto Horno a arrabio
 p pelet as acero sólido
 s sinter ac acero comercial

Tabla 21. Procesos del sistema para Producción. Tecnología (DRI+EAF)

Reducción Directa (DRI): 479 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
Gas natural	4,855.14	MJ	101	kg	48,000	MJ/t	56,100	0.0561	272.4
Electricidad	108.73	MJ	10	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	5.8
total energía de entrada:			4,963.88 MJ/t ac				CO2:		278.2
participación en el proceso:			34.1%		participación en el proceso:			34.1%	

Horno de Arco Eléctrico (EAF): 1177 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
Gas natural	1,794.93	MJ	37	kg	48,000	MJ/t	56,100	0.0561	100.7
Electricidad	2,517.60	MJ	243	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	134.0
Carbón	366.05	MJ	16	kg	22,187	MJ/t	94,600	0.0946	34.6
Hierro esponja			479	kg					
total energía de entrada:			4,678.58 MJ/t ac				CO2:		269.3
participación en el proceso:			32.2%		participación en el proceso:			33.1%	

Laminación: 1,000 kg

Entrada de energía			volúmenes		poder calorífico		factor de emisión		total
							kg CO2/TJ	kg CO2/MJ	kg CO2/t ac
Gas natural	2,300.00	MJ	48	kg	48,000	MJ/t	56,100	0.0561	129.0
Electricidad	2,600.00	MJ	250	KWh	10,381	MJ/MWh	53,233	0.0532	138.4
Acero sólido			1,177	kg					
total energía de entrada:			4,900.00 MJ/t ac				CO2:		267.4
participación en el proceso:			33.7%		participación en el proceso:			32.8%	

Totales por tonelada de acero comercial (tecnología DRI+EAF)			
Energía de entrada (MJ):	14,542.45	Emisiones de CO2 (kg):	814.94

Simbología:

- DRI Reducción Directa del Acero
- EAF Horno de Arco Eléctrico
- he hierro esponja
- as acero sólido
- ac acero comercial

4.2.2.3. **Calidad de los datos utilizados**

- Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel, del European IPPC Bureau, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC: 2001). Documento fuente del IPCC en sus Directrices del 2006. Presenta información típica sobre aspectos ambientales de plantas productoras de acero integradas en la Unión Europea.
 - *Antigüedad de datos: 1996 a 1998.*
 - *Geografía: Datos de la Unión Europea.*
 - *Tecnología: Datos mixtos, ya que en sus análisis incorpora tecnologías que van desde las anticuadas hasta las mejores disponibles en el momento.*
 - *Representatividad: Promedio de procesos con salidas similares.*

- Draft Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Iron and Steel, del European IPPC Bureau, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC: 2008). Contiene información actualizada del documento de referencia anterior.
 - *Antigüedad de datos: 2004*
 - *Geografía: Datos de la Unión Europea.*
 - *Tecnología: Datos mixtos, ya que en sus análisis incorpora tecnologías que van desde las anticuadas hasta las mejores disponibles en el momento.*
 - *Representatividad: Promedio de procesos con salidas similares.*

- Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002. Instituto Nacional de Ecología y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT, 2006). Utiliza información oficial de consumos de materiales en algunos procesos de producción.

- *Antigüedad de datos:* 2002
 - *Geografía:* Datos nacionales
 - *Tecnología:* Datos mixtos
 - *Representatividad:* Promedio de procesos con salidas similares.
-
- *HYL Reducción Directa.* Información de productos y servicios de la empresa HYLSA. Una de las principales empresas productoras de acero en México. Consultada en:
http://www.hylsamex.com.mx/hyl/hyl_ps_hyltech_proceso_c.htm
 - Antigüedad de datos: 2001
 - Geografía: Datos nacionales.
 - Tecnología: la mejor disponible en el momento.
 - Representatividad: Datos de una empresa y proceso específicos.

4.2.3. Concentrado de procesos

Tabla 22. Procesos individuales y del sistema. Tecnología BF+BOF

Peletización

para 1000 kg	MJ/t		kg CO2/t	
producción	435.0	17.3%	35.2	19.6%
extracción de materiales	231.9	9.2%	14.2	7.9%
transporte	1,846.3	73.5%	130.0	72.4%
sumatorias:	2,513.2	100.0%	179.4	100.0%
para 1589 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	691.2	17.3%	56.0	19.6%
extracción de materiales	368.6	9.2%	22.6	7.9%
transporte	2,933.7	73.5%	206.5	72.4%
sumatorias:	3,993.5	100.0%	285.1	100.0%
participación en el proceso total:	11.8%		9.3%	

Sinterizado

para 1000 kg	MJ/t		kg CO2/t	
producción	1,652.0	45.2%	149.8	51.9%
extracción de materiales	194.2	5.3%	11.9	4.1%
transporte	1,805.9	49.4%	127.1	44.0%
sumatorias:	3,652.1	100.0%	288.8	100.0%
para 1181 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	1,951.0	48.7%	176.9	55.4%
extracción de materiales	229.3	5.7%	14.1	4.4%
transporte	1,825.6	45.6%	128.5	40.2%
sumatorias:	4,005.9	100.0%	319.5	100.0%
participación en el proceso total:	11.8%		10.4%	

Horno de Coque

para 1000 kg	MJ/t		kg CO2/t	
producción	33,023.1	100.0%	3,356.8	100.0%
extracción de materiales		0.0%		0.0%
transporte		0.0%		0.0%
sumatorias:	33,023.1	100.0%	3,356.8	100.0%
para 368 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	12,152.5	100.0%	1,235.3	100.0%
extracción de materiales		0.0%		0.0%
transporte		0.0%		0.0%
sumatorias:	12,152.5	100.0%	1,235.3	100.0%
participación en el proceso total:	35.8%		40.1%	

Alto Horno

para 1000 kg	MJ/t		kg CO2/t	
producción	24,100.5	98.5%	2,472.0	99.0%
extracción de materiales	40.6	0.2%	2.5	0.1%
transporte	331.9	1.4%	23.4	0.9%
sumatorias:	24,473.1	100.0%	2,497.9	100.0%
para 1142 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	7,457.3	92.7%	819.2	96.6%
extracción de materiales	219.8	2.7%	2.8	0.3%
transporte	369.4	4.6%	26.0	3.1%
sumatorias:	8,046.5	100.0%	848.0	100.0%
participación en el proceso total:	23.7%		27.5%	

Horno Básico de Oxígeno

para 1000 kg	MJ/t		kg CO2/t	
producción	23,877.5	99.5%	2,418.3	99.7%
extracción de materiales	10.8	0.0%	0.7	0.0%
transporte	101.0	0.4%	7.1	0.3%
sumatorias:	23,989.3	100.0%	2,426.1	100.0%
para 1177 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	588.5	83.7%	24.0	75.2%
extracción de materiales	12.7	1.8%	0.8	2.4%
transporte	101.5	14.4%	7.1	22.4%
sumatorias:	702.7	100.0%	31.9	100.0%
participación en el proceso total:	2.1%		1.0%	

Laminación

para 1000 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	5,085.0	100.0%	360.5	100.0%
extracción de materiales		0.0%		0.0%
transporte		0.0%		0.0%
sumatorias:	5,085.0	100.0%	360.5	100.0%
participación en el proceso total:	15.0%		11.7%	

total para 1000 kg de acero comercial:	33,986.2		3,080.3	
---	-----------------	--	----------------	--

BF: Alto Horno
BOF: Horno Básico de Oxígeno
MJ: Megajoules
ac: acero comercial

Tabla 23. Procesos individuales y del sistema. Tecnología DRI+EAF

Reducción Directa de Acero

para 1000 kg	MJ/t		kg CO2/t	
producción	10,363.0	77.5%	580.7	73.6%
extracción de materiales	335.1	2.5%	20.6	2.6%
transporte	2,667.1	20.0%	187.7	23.8%
sumatorias:	13,365.1	100.0%	789.0	100.0%
para 479 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	4,963.9	77.5%	278.2	73.6%
extracción de materiales	160.5	2.5%	9.9	2.6%
transporte	1,277.5	20.0%	89.9	23.8%
sumatorias:	6,401.9	100.0%	377.9	100.0%
participación en el proceso total:	39.5%		40.7%	

Horno de Arco Eléctrico

para 1000 kg	MJ/t		kg CO2/t	
producción	8,938.9	97.3%	507.0	96.8%
extracción de materiales	20.4	0.2%	1.3	0.2%
transporte	223.5	2.4%	15.7	3.0%
sumatorias:	9,182.8	100.0%	524.0	100.0%
para 1177 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	4,678.6	95.6%	269.3	94.8%
extracción de materiales	24.0	0.5%	1.5	0.5%
transporte	190.9	3.9%	13.4	4.7%
sumatorias:	4,893.4	100.0%	284.3	100.0%
participación en el proceso total:	30.2%		30.6%	

Laminación

para 1000 kg	MJ/t ac		kg CO2/t ac	
producción	4,900.0	100.0%	267.4	100.0%
extracción de materiales		0.0%		0.0%
transporte		0.0%		0.0%
sumatorias:	4,900.0	100.0%	267.4	100.0%
participación en el proceso total:	30.3%		28.8%	

total para 1000 kg de acero comercial:	16,195.3		929.6	
---	-----------------	--	--------------	--

DRI: Reducción Directa de Acero

EAF: Horno de Arco Eléctrico

MJ: Megajoules

ac: acero comercial

Tabla 24. Concentrado de procesos. Tecnología (BF+BOF)

Proceso	Extracción		Transporte		Producción		totales		participación	
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac
Peletización (1589 kg)	368.6	22.6	2,933.7	206.5	691.2	56.0	3,993.5	285.1	11.8%	9.3%
Sinterizado (1181kg)	229.3	14.1	1,825.6	128.5	1,951.0	176.9	4,005.9	319.5	11.8%	10.4%
Horno de Coque (368 kg)					12,152.5	1,235.3	12,152.5	1,235.3	35.8%	40.1%
Alto Horno (1142 kg)	219.8	2.8	369.4	26.0	7,457.3	819.2	8,046.5	848.0	23.7%	27.5%
Horno Básico de Oxígeno (1177 kg)	12.7	0.8	101.5	7.1	588.5	24.0	702.7	31.9	2.1%	1.0%
Laminación (1000 kg)					5,085.0	360.5	5,085.0	360.5	15.0%	11.7%
totales:	830.5	40.3	5,230.2	368.1	27,925.5	2,671.8	33,986.2	3,080.3	100.0%	100.0%
participación:	2.4%	1.3%	15.4%	12.0%	82.2%	86.7%	100.0%	100.0%		

BF: Alto Horno
BOF: Horno Básico de Oxígeno
MJ: Megajoules
ac: acero comercial

Tabla 25. Concentrado de procesos. Tecnología (DRI+EAF)

Proceso	Extracción		Transporte		Producción		totales		participación	
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac
Reducción Directa de Acero (479 kg)	160.5	9.9	1,277.5	89.9	4,963.9	278.2	6,401.89	377.93	39.5%	40.7%
Horno de Arco Eléctrico (1177 kg)	24.0	1.5	190.9	13.4	4,678.6	269.3	4,893.43	284.25	30.2%	30.6%
Laminación (1000 kg)					4,900.0	267.4	4,900.00	267.44	30.3%	28.8%
totales:	184.5	11.3	1,468.4	103.4	14,542.5	814.9	16,195.33	929.62	100.0%	100.0%
participación:	1.1%	1.2%	9.1%	11.1%	89.8%	87.7%	100.0%	100.0%		

DRI: Reducción Directa de Acero
EAF: Horno de Arco Eléctrico
MJ: Megajoules
ac: acero comercial

La cantidad de energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil del acero a lo largo de las etapas de extracción, transporte y producción (ciclo de vida de la cuna a la fábrica), se presentan a continuación, así como el Grado de Emisión Energética de CO₂:

Tabla 26. Grado de Emisión Energética de CO₂. Tecnología BF + BOF

Proceso	Extracción		Transporte		Producción		totales		Grado de Emisión Energética de CO ₂
	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	kg CO ₂ /MJ
Peletización (1589 kg)	368.6	22.6	2,933.7	206.5	691.2	56.0	3,993.5	285.1	0.07139
Sinterizado (1181kg)	229.3	14.1	1,825.6	128.5	1,951.0	176.9	4,005.9	319.5	0.07975
Horno de Coque (368 kg)					12,152.5	1,235.3	12,152.5	1,235.3	0.10165
Alto Horno (1142 kg)	219.8	2.8	369.4	26.0	7,457.3	819.2	8,046.5	848.0	0.10539
Horno Básico de Oxígeno (1177 kg)	12.7	0.8	101.5	7.1	588.5	24.0	702.7	31.9	0.04546
Laminación (1000 kg)					5,085.0	360.5	5,085.0	360.5	0.07090
totales:	830.5	40.3	5,230.2	368.1	27,925.5	2,671.8	33,986.2	3,080.3	0.09063
Grado de Emisión Energética de CO₂ (kg CO₂/MJ)	0.04856		0.07039		0.09568		0.09063		

Tabla 27. Grado de Emisión Energética de CO₂. Tecnología DRI + EAF

Proceso	Extracción		Transporte		Producción		totales		Grado de Emisión Energética de CO ₂
	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	kg CO ₂ /MJ
Reducción Directa de Acero (479 kg)	160.5	9.9	1,277.5	89.9	4,963.9	278.2	6,401.89	377.93	0.05903
Horno de Arco Eléctrico (1177 kg)	24.0	1.5	190.9	13.4	4,678.6	269.3	4,893.43	284.25	0.05809
Laminación (1000 kg)					4,900.0	267.4	4,900.00	267.44	0.05458
totales:	184.5	11.3	1,468.4	103.4	14,542.5	814.9	16,195.33	929.62	0.05740
Grado de Emisión Energética de CO₂ (kg CO₂/MJ)	0.06137		0.07039		0.05604		0.05740		

4.3. Evaluación

4.3.1. Análisis de integridad

**Tabla 28. Listado de flujos de entrada y salida del sistema.
Tecnología BF + BOF**

Procesos unitarios	Materiales	Energía	Productos	Salidas	Ubicación
Extracción	mineral de hierro caliza/dolomita bentonita olivino cal ferroaleaciones	-	-	CO ₂	Tablas 12
Transporte	mineral de hierro caliza/dolomita bentonita olivino pelets cal ferroaleaciones	-	-	CO ₂	Tablas 14
Peletización	mineral de hierro caliza/dolomita bentonita olivino	coque gas horno de coque gas natural electricidad	Pelets	CO ₂	Tablas 12
Sinterizado	mineral de hierro cal caliza/dolomita aditivos	coque gas horno de coque gas de alto horno electricidad vapor	sinter	CO ₂	Tabla 12
Horno de coque	carbón	gas horno de coque gas de alto horno electricidad vapor	coque gas horno de coque electricidad	CO ₂	Tabla 12
Alto horno	carbón mineral de hierro pelets sinter	coque gas horno de coque gas de alto horno electricidad vapor	arrabio gas de alto horno electricidad	CO ₂	Tabla 12
Horno básico de oxígeno	arrabio mineral de hierro cal caliza/dolomita ferroaleaciones	coque gas horno de coque electricidad vapor	acero sólido gas de horno básico de oxígeno electricidad	CO ₂	Tabla 12
Laminación	acero sólido	electricidad gas natural	acero comercial	CO ₂	Tabla 12

**Tabla 29. Listado de flujos de entrada y salida del sistema.
Tecnología DRI + EAF**

Procesos unitarios	Materiales	Energía	Productos	Salidas	Ubicación
Extracción	mineral de hierro caliza/dolomita cal electrodos grafito ferroaleaciones	-	-	CO ₂	Tabla 13
Transporte	mineral de hierro caliza/dolomita cal electrodos grafito ferroaleaciones	-	-	CO ₂	Tabla 15
Reducción directa	mineral de hierro	gas natural electricidad	hierro esponja	CO ₂	Tabla 13
Horno de arco eléctrico	carbón hierro esponja caliza/dolomita cal coque electrodos grafito ferroaleaciones	gas natural electricidad	acero sólido	CO ₂	Tabla 13
Laminación	acero sólido	gas natural electricidad	acero comercial	CO ₂	Tabla 13

**Tabla 30. Listado de flujos de entradas y salidas del sistema.
Procesos complementarios**

Procesos complementarios	Materiales	energía	productos	salidas	Ubicación
Producción de electricidad	-	carbón diesel combustoleo gas seco	electricidad	CO ₂	Tabla 6
Extracción de materiales	-	coque de carbón gas licuado diesel combustóleo gas seco electricidad	-	CO ₂	Tabla 7
Autotransporte de carga	-	gas licuado gasolinas diesel gas natural	-	CO ₂	Tabla 8
Transporte ferroviario	-	diesel electricidad	-	CO ₂	Tabla 9

4.3.2. Análisis de sensibilidad

En el capítulo 3 del presente documento, en el apartado relacionado con la definición del Objetivo y Alcance del estudio y con relación a la definición del nivel de profundidad del estudio, se recomendó utilizar un nivel dos de profundidad, el cual asegura como mínimo, la consideración de cerca del 80% de los impactos, energía y emisiones generadas. Bajo este supuesto, hay un 20% de información que se ha quedado fuera del estudio.

A continuación se realiza un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos de las dos tecnologías de producción de acero, considerando un +/- 20% de modificación en los datos de entrada (consumo de energía) y salida (emisiones de CO₂), lo que permitirá observar el comportamiento total del sistema y de las diferentes etapas de la producción de acero ante la inclusión o exclusión de tal porcentaje de información, y con esto, identificar los factores principales de incertidumbre de los resultados obtenidos y la variación que sufre el Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}) calculado originalmente.

En la Tabla 31, se señala con rojo la información que fue modificada para la realización del análisis de sensibilidad en la tecnología BF + BOF.

Tabla 31. Tecnología BF + BOF

Proceso	Extracción		Transporte		Producción		totales		Grado de Emisión Energética de CO ₂
	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	kg CO ₂ /MJ
Peletización (1589 kg)	368.6	22.6	2,933.7	206.5	691.2	56.0	3,993.5	285.1	0.07139
Sinterizado (1181kg)	229.3	14.1	1,825.6	128.5	1,951.0	176.9	4,005.9	319.5	0.07975
Horno de Coque (368 kg)					12,152.5	1,235.3	12,152.5	1,235.3	0.10165
Alto Horno (1142 kg)	219.8	2.8	369.4	26.0	7,457.3	819.2	8,046.5	848.0	0.10539
Horno Básico de Oxígeno (1177 kg)	12.7	0.8	101.5	7.1	588.5	24.0	702.7	31.9	0.04546
Laminación (1000 kg)					5,085.0	360.5	5,085.0	360.5	0.07090
totales:	830.5	40.3	5,230.2	368.1	27,925.5	2,671.8	33,986.2	3,080.3	0.09063
Grado de Emisión Energética de CO₂ (kg CO₂/MJ)		0.04856		0.07039		0.09568		0.09063	

Suponiendo una omisión de datos de entrada y salida al sistema (consumo de energía y emisiones de CO2), equivalentes a un 20% durante la etapa de Extracción, Transporte y Producción (ver datos en las Tablas 32, 33 y 34 siguientes, remarcados en negro), se obtienen los siguientes resultados en la cantidad total de energía y emisiones de CO2 por la fabricación de 1 tonelada de acero comercial:

- La modificación del 20% de los datos durante la etapa de Extracción produce una alteración en los resultados totales de un +/- 0.49% cuando más.
- Durante la etapa de Transporte, la modificación del 20% de los datos origina un cambio en los resultados totales de cuando mucho +/- 3%.
- En la etapa de Producción, la alteración del 20% de los datos provoca una variación máxima de +/- 17.3%.

Tabla 32. Modificación de entradas en la etapa de Extracción.

extracción						
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	totales		diferencia con resultados originales	
	996.58	40.3	34,152.30	3,080.29		
GEE _{CO2}		0.04046		0.09019	- 0.00044	-0.49%
GEE _{CO2}	830.5	48.39	33,986.20	3,088.36		
		0.05827		0.09087	0.00024	0.26%

Tabla 33. Modificación de entradas en la etapa de Transporte.

transporte					
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	totales		diferencia con resultados originales
GEE _{CO2}	6,276.27692	368.13126	35,032.25	3,080.29	
		0.05865		0.08793	- 0.0027 -3.0%
GEE _{CO2}	5,230.2	441.76	33,986.20	3,153.92	
		0.08446		0.09280	0.0022 2.4%

Tabla 34. Modificación de entradas en la etapa de Producción.

producción					
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	totales		diferencia con resultados originales
GEE _{CO2}	33,510.59	2,671.8	39,571.30	3,080.29	
		0.07973		0.07784	- 0.0128 -14.1%
GEE _{CO2}	27,925.5	3,206.20	33,986.20	3,614.66	
		0.11481		0.10636	0.016 17.3%

La información modificada en los resultados de la tecnología DRI + EAF, se señalan a continuación con rojo en la Tabla 35.

Tabla 35. Tecnología DRI + EAF

Proceso	Extracción		Transporte		Producción		totales		Grado de Emisión Energética de CO2
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	MJ/t ac	kg CO2/t ac	kg CO2/MJ
Reducción Directa de Acero (479 kg)	160.5	9.9	1,277.5	89.9	4,963.9	278.2	6,401.89	377.93	0.05903
Horno de Arco Eléctrico (1177 kg)	24.0	1.5	190.9	13.4	4,678.6	269.3	4,893.43	284.25	0.05809
Laminación (1000 kg)					4,900.0	267.4	4,900.00	267.44	0.05458
totales:	184.5	11.3	1,468.4	103.4	14,542.5	814.9	16,195.33	929.62	0.05740
Grado de Emisión Energética de CO2 (kg CO2/MJ)		0.06137		0.07039		0.05604		0.05740	

- La modificación de los datos durante la etapa de Extracción produce una alteración en los resultados totales de un +/- 0.24% cuando más (Tabla 36).
- Durante la etapa de Transporte, la modificación de los datos origina un cambio en los resultados totales de cuando mucho +/- 2.2% (Tabla 37).
- En la etapa de Producción, la alteración de los datos provoca una variación máxima de +/- 17.5% (Tabla 38).

Tabla 36. Modificación de entradas en etapa de Extracción

extracción					
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	totales		diferencia con resultados originales
GEE _{CO2}	221.37	11.3	16,232.22	929.62	
		0.05114		0.05727	- 0.00013
GEE _{CO2}	184.5	13.59	16,195.33	931.88	
		0.07365		0.05754	0.00014

Tabla 37. Modificación de entradas en etapa de Transporte

transporte					
	MJ/t ac	kg CO2/t ac	totales		diferencia con resultados originales
GEE _{CO2}	1,762.08605	103.35410	16,489.01	929.62	
		0.05865		0.05638	- 0.0010
GEE _{CO2}	1,468.4	124.02	16,195.33	950.29	
		0.08446		0.05868	0.0013

Tabla 38. Modificación de entradas en etapa de Producción

producción					
	MJ/t ac	kg CO ₂ /t ac	totales		diferencia con resultados originales
	17,450.94	814.9	19,103.82	929.62	
		0.04670		0.04866	- 0.0087
GEE_{CO2}					-15.2%
	14,542.5	977.93	16,195.33	1,092.61	
GEE_{CO2}		0.06725		0.06746	0.0101
					17.5%

De lo anterior se puede obtener las siguientes conclusiones:

- Una variación de 20% en la proporción de cantidad de energía consumida por emisiones de CO₂, durante las etapas de Extracción y Transporte en ambas tecnologías de acero, no altera significativamente el Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}) obtenido (produce una alteración máxima de +/- 3%).
- Durante la etapa de Producción, dicha modificación en los datos, puede provocar hasta un +/- 17.5% de variación máxima en el valor del GEE_{CO2} de ambas tecnologías.

Se concluye por lo tanto, que la etapa de Producción, la cual comprende los procesos unitarios relacionados con la fabricación del acero, es la principal causa de incertidumbre en los resultados obtenidos.

Con la intención de identificar los procesos unitarios que son más sensibles ante la modificación de los datos en la etapa de Producción, se aplica el mismo procedimiento a esta etapa, encontrando lo siguiente (Tabla 39 y 40):

Tabla 39. Tecnología BF + BOF

	Producción							
	datos originales		20% menos en la proporción			20 % más en la proporción		
	MJ/t	kg CO ₂ /t	GEE _{CO₂}	diferencia	porcentaje	GEE _{CO₂}	diferencia	porcentaje
Peletización	691.2	56.0	0.09521	- 0.00047	-0.49%	0.09608	0.00040	0.42%
Sinterizado	1,951.0	176.9	0.09436	- 0.00132	-1.38%	0.09694	0.00127	1.32%
Horno de Coque	12,152.5	1,235.3	0.08802	- 0.00766	-8.01%	0.10452	0.00885	9.25%
Alto Horno	7,457.3	819.2	0.09083	- 0.00485	-5.07%	0.10154	0.00587	6.13%
Horno Básico de Oxígeno	588.5	24.0	0.09528	- 0.00040	-0.42%	0.09585	0.00017	0.18%
Laminación	5,085.0	360.5	0.09232	- 0.00336	-3.51%	0.09826	0.00258	2.70%
sumatoria	27,925.5	2,671.8						
GEE _{CO₂}		0.09568						

La Tabla anterior muestra que, ante una variación de 20% en la proporción de la cantidad de energía por emisiones de CO₂ en el proceso unitario de Horno de Coque en la tecnología BF + BOF, el valor del GEE_{CO₂} de la etapa de Producción se puede ver modificado en +/- 9.25% cuando más, constituyéndose en la causa principal de incertidumbre de dicha etapa. A su vez, dicho aumento puede provocar en el GEE_{CO₂} de todo el sistema, una variación máxima de +/- 2.91%. Cabe mencionar, que de acuerdo con la Tabla 24, esta etapa de Horno de Coque aporta el 35.8% del total de energía y el 40.1% de las emisiones de CO₂ de todo el sistema.

Se puede concluir que, si se tuvieran errores de +/- 20% en el 35.8% de la energía total de entrada y en el 40.1% de las emisiones reportadas, el GEE_{CO₂} de todo el sistema podría variar un +/- 2.91% como máximo.

Tabla 40. Tecnología DRI + EAF

	Producción							
	datos originales		20% menos en la proporción			20 % más en la proporción		
	MJ/t	kg CO ₂ /t	GEE _{CO₂}	diferencia	porcentaje	GEE _{CO₂}	diferencia	porcentaje
Reducción Directa de Acero	4,963.9	278.2	0.05246	- 0.00358	-6.39%	0.05986	0.00383	6.83%
Horno de Arco Eléctrico	4,678.6	269.3	0.05265	- 0.00339	-6.05%	0.05974	0.00370	6.61%
Laminación	4,900.0	267.4	0.05250	- 0.00354	-6.31%	0.05972	0.00368	6.56%
sumatoria	14,542.5	814.9						
GEE _{CO₂}		0.05604						

En la tecnología de DRI + EAF, una modificación de 20% en la proporción de la cantidad de energía por emisiones de CO₂ en el proceso unitario de Reducción Directa de Acero, trae como consecuencia una modificación en el GEE_{CO₂} de la etapa de Producción de +/- 6.83% y de +/- 5.75% en el GEE_{CO₂} de todo el sistema; es la principal causa de incertidumbre durante la etapa de Producción de dicha tecnología. El proceso de Reducción Directa de Acero aporta el 39.5% del total de la energía suministrada al sistema y el 40.7% del total de emisiones (Tabla 25).

El análisis de sensibilidad permite concluir que, si se tuvieran errores de +/- 20% en aproximadamente el 40% de las entradas de energía reportadas al sistema y de las emisiones de CO₂ estimadas, el GEE_{CO₂} de todo el sistema podría variar un +/- 5.75% cuando más.

4.3.3. Análisis de coherencia

La aplicación particular del análisis de la calidad de los datos fue realizado en la etapa del Inventario, al final de cada presentación de datos. A continuación se resume en la Tabla 31, la información obtenida.

Tabla 41. Resumen de calidad de datos utilizados

Antigüedad		
	Extracción y Transporte	Producción
1996-1998	-	25%
2001	-	25%
2002	-	25%
2003	20%	-
2003-2007	20%	-
2004	-	25%
2005	20%	-
2006	40%	-

Geografía		
	Extracción y Transporte	Producción
nacional	80%	50%
internacional	20%	-
unión europea	-	50%

Tecnología		
	Extracción y Transporte	Producción
datos mixtos	100%	75%
moderna	-	25%

Representatividad		
	Extracción y Transporte	Producción
promedio de procesos	100%	75%
datos de empresa	-	25%

Del resumen anterior podemos observar, que las fuentes más recientes utilizadas en la etapa de Extracción y Transporte, corresponden al año 2006, y constituyen el 40% de las mismas, mientras que en la etapa de Producción, las fuentes más recientes alcanzan el 25%, y corresponden al año 2004.

Con relación a la geografía se puede apreciar, que el 80% de las fuentes de los datos, en la etapa de Extracción y Transporte, se aplica a un área geográfica nacional, mientras que en la etapa de Producción, las fuentes se comparten mitad y mitad entre área geográfica nacional y unión europea. En total, las fuentes de aplicación nacional alcanzan el 67% de las totales utilizadas.

La tecnología a que hacen referencia las fuentes consultadas, se refiere en su mayoría, a tecnología mixta, que es aquella que considera datos promedio correspondientes a la mezcla de tecnología antigua y moderna, y alcanza el 89% de las fuentes consultadas. La representatividad de los datos se refiere, a la aplicabilidad de estos a procesos semejantes, predominando con un 89%, las fuentes referidas a datos que constituyen promedios de procesos.

4.3.4. Análisis de resultados

La tecnología BF + BOF, demanda de energía 33,986.2 MJ para la producción de una tonelada de acero comercial, lo cual genera 3,080.3 kg de CO₂. Mientras que la tecnología DRI + EAF, consume 16,195.33 MJ para obtener una tonelada de acero comercial, lo que origina la emisión de 929.62 kg de CO₂ a la atmósfera.

Como se puede observar en las Tablas 26 y 27, la tecnología de Reducción Directa del Acero y Horno de Arco Eléctrico (DRI + EAF) tiene un Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}) menor que la tecnología de Alto Horno y Horno Básico de Oxígeno (BF + BOF), lo que quiere decir, que la tecnología DRI + EAF emite menor cantidad de CO₂ de origen fósil por megajoule de energía utilizado.

Analizando los procesos de producción en las diferentes etapas del ciclo de vida del acero, se observa lo siguiente:

- En la tecnología BF + BOF, la menor emisión de CO₂ por energía consumida (megajoule) se realiza durante el proceso de Horno Básico de Oxígeno, en tanto que el proceso de producción de Alto Horno, es el de mayor emisión de CO₂ por megajoule utilizado, el cual supera el GEE_{CO2} de todo el sistema. Sin embargo, el proceso de más alto consumo de energía y emisiones de CO₂ en el sistema es el Horno de Coque. Esto habla de que la energía utilizada durante el proceso de Alto Horno es de menor calidad³¹ que la demandada en el proceso de Horno de Coque.

³¹ . La calidad de la energía puede variar básicamente por dos razones: 1) la proporción de combustibles fósiles y de energía renovable y nuclear utilizada; 2) el tipo de combustible fósil utilizado. La energía procedente de fuentes renovables y de energía nuclear no genera emisiones de CO₂, sin embargo los megajoules demandados si son considerados. Con respecto a los combustibles fósiles, el carbón es el más "sucio" en cuanto a emisiones de CO₂ (0.0946 kgCO₂/MJ), le sigue el petróleo (0.0733 kgCO₂/MJ) y al último el gas natural (0.0561 kgCO₂/MJ); la actual mezcla de fuentes de energía para producir electricidad en México, produce 0.0532 kgCO₂/MJ. Por lo anterior, la cantidad en que son utilizados cada una de estas fuentes de energía, puede modificar la emisión final de CO₂.

Durante la etapa de Producción, se genera la mayor cantidad de emisiones de CO₂ por energía utilizada, lo que se refleja en un GEE_{CO2} alto, aún más alto que el obtenido en todo el sistema. Esta etapa consumen el 82.2% de la energía total demandada, y genera el 86.7% del total de emisiones de CO₂.

- En la tecnología DRI + EAF, el menor GEE_{CO2} lo tiene el proceso de Laminación, mientras que el mayor GEE_{CO2} corresponde al proceso de Reducción Directa de Acero.

La etapa de Transporte, tiene un GEE_{CO2} más alto que la Extracción y la etapa de Producción, y es aún mayor que el total del sistema, a pesar de sólo demandar el 15.4% de la energía total del sistema, y emitir el 12% de las emisiones de CO₂ generadas.

La capacidad de carga óptima de CO₂ (CCO_{CO2}) en kilogramos de CO₂ por megajoule (kgCO₂/MJ) para México, está determinada por el siguiente intervalo:

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

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 3, cualquier valor de GEE_{CO2} que se encuentre dentro de este intervalo, se considera sustentable.

El GEE_{CO2} de la tecnología BF + BOF es 0.09063 kg de CO₂/MJ, mientras que el de la tecnología DRI + EAF es 0.05740 kg de CO₂/MJ. Comparando estos con la CCO_{CO2} de evaluada para México tenemos:

- Tecnología BF + BOF: GEE_{CO2} > CCO_{CO2}; por lo tanto, es no sustentable
- Tecnología DRI + EAF: GEE_{CO2} > CCO_{CO2}; por lo tanto, es no sustentable

4.4. Interpretación

Se observa por lo tanto, que el GEE_{CO_2} de la tecnología BF + BOF se encuentra fuera del intervalo de capacidad de carga óptima (es más de 3 veces la capacidad máxima de carga), y es mayor que el límite máximo con 0.06145 kgCO₂/MJ, lo que quiere decir que el 67.8% de sus emisiones no puede ser absorbidas por los sumideros de carbono de la Tierra, aportándose esa cantidad (2,088.4 kg de CO₂) al total de CO₂ que ya existe en la atmósfera, cada vez que se produce una tonelada de acero comercial.

El GEE_{CO_2} de la tecnología DRI + EAF es 0.05740 kgCO₂/MJ, lo que representa 1.97 veces la capacidad de carga máxima de nuestro ambiente, superándolo con 0.02822 kgCO₂/MJ. El 49.2% de las emisiones generadas por la producción de una tonelada de acero comercial, no pueden ser absorbidas por los sumideros de carbono de la Tierra, adicionándose como consecuencia a las emisiones ya existentes en la atmósfera 457.4 kg de CO₂, cada vez que se produce la cantidad mencionada de acero.

El comparativo del Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO_2}) de las dos tecnologías con la capacidad de carga óptima de CO₂ para México, muestra un importante porcentaje de emisiones que se quedan en la atmósfera cada vez que se produce una tonelada de acero comercial en México, las cuales contribuyen con su acumulación al efecto invernadero, y con esto, a calentar más nuestro planeta. De acuerdo con lo anterior, los excesos en la cantidad de emisiones de CO₂ por unidad de energía incorporada de las dos tecnologías, contribuyen a romper el equilibrio ambiental de nuestro planeta, por lo que no se pueden considerar sustentables.

CONCLUSIONES

A continuación se presentan y discuten, las principales contribuciones del presente trabajo de investigación:

1) Ante el problema planteado en la introducción del presente documento, relacionado con la ausencia de metodologías de análisis de energía incorporada y emisiones de CO₂ de materiales de construcción durante sus procesos de producción, que señalen cuándo se ha rebasado el límite de capacidad de carga de nuestro ambiente en la evaluación de su sustentabilidad, se desarrolló una Metodología de Evaluación de Materiales de Construcción (MEMAC), la cual se basa en la normatividad del ACV.

La MEMAC desarrollada, posibilita la evaluación del nivel de sustentabilidad a lo largo de los procesos de producción de materiales de construcción (desde la etapa de Extracción hasta su Fabricación); permite identificar el límite de emisión máxima de CO₂ a la atmósfera que soporta nuestro planeta, según la cantidad de material que se produzca, y facilita la determinación de objetivos de reducción sustentables durante las etapas y procesos de producción.

Las bases en que se sustenta la MEMAC, pueden ser utilizadas para el análisis y evaluación del resto de las etapas del ciclo de vida de los materiales (etapas de: Construcción, Uso y Demolición), ya que el punto clave de la presente metodología es la obtención de la proporción de la cantidad de emisiones de CO₂ de origen fósil por consumo de energía (factor GEE_{CO_2}) y su comparación con las capacidades naturales de la Tierra (indicador CCO_{CO_2}). De igual modo, otros materiales, productos o actividades no relacionados con la edificación pueden ser evaluados también.

2) El desarrollo de la MEMAC durante los capítulos 2 y 3, y su aplicación en el capítulo 4, permitió comprobar la hipótesis planteada en la introducción del presente documento, demostrando que es posible determinar el nivel de sustentabilidad de materiales de construcción con base en la cantidad de energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil relacionadas (factor GEE_{CO2}) y su comparación con la capacidad de absorción y almacenamiento de los sumideros de carbono de la Tierra (indicador CCO_{CO2}).

3) Se identificó un factor llamado Grado de Emisión Energética de CO₂ (GEE_{CO2}), que consiste en una proporción que representa, la cantidad de emisiones de CO₂ de origen fósil en kilogramos por cada megajoule de energía consumida, sea cual sea su origen; su obtención es determinante en la evaluación de la sustentabilidad.

Para la producción de una tonelada de acero comercial el GEE_{CO2} de la tecnología BF + BOF resultó de 0.09063 kg de CO₂/MJ, mientras que el GEE_{CO2} de la tecnología DRI + EAF fue de 0.05740 kg de CO₂/MJ; si consideramos una variación en la cantidad de acero producido (500 kg, 10 toneladas o 100 toneladas por ejemplo), manteniendo constantes las condiciones de producción (tecnología utilizada, procesos y etapas consideradas, límites del sistema, entradas y salidas, etc.), el GEE_{CO2} se mantendrá sin alteración alguna, ya que aunque cambien las cantidades de energía demanda y emisiones de CO₂ que se generen, estas participarán finalmente en igual proporción que la ya calculada.

4) Se determinó un indicador para México llamado Capacidad de Carga Óptima de CO₂ (CCO_{CO2}), representado por el siguiente intervalo: $0 \leq CCO_{CO2} \leq 0.02918$ kg de CO₂/MJ, el cual representa el nivel de relación más adecuado entre consumo de energía y emisiones de CO₂ de origen fósil, y la capacidad de absorción y almacenamiento de los sumideros de carbono del planeta. Este parámetro se puede utilizar para medir el nivel de sustentabilidad de cualquier GEE_{CO2} que se evalúe en México, así mismo, con el procedimiento expuesto en el capítulo 3, puede determinarse también la CCO_{CO2} para cualquier país del mundo, como se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42. Indicador de CCO_{CO2} evaluado para algunos países del mundo

País/región	Mtoe	MtCO ₂	Kg de CO ₂ /MJ	CCO _{CO2} (kg de CO ₂ /MJ) * 0.55
Mundo	11,740	27,136	0.05668	0.03117
Canadá	269.74	548.59	0.04817	0.02649
Dinamarca	20.93	47.51	0.0578	0.03182
Francia	272.67	388.38	0.0336	0.01848
Perú	13.55	28.4	0.0491	0.02701
Estados Unidos	2,320.7	5,816.96	0.05936	0.03265

1 toe = 41,870 MJ; Datos del año 2005 tomados de Key World Energy Statistics (IEA, 2007).

Para el cálculo de la CCO_{CO2} se utilizó un factor global de 0.55% (según lo realizado en el punto 2.3 del presente documento), el cual representa la proporción promedio de emisiones de CO₂ que es absorbida y almacenada por los bosques y océanos de la Tierra. Sin embargo, la capacidad de absorción y almacenamiento tanto de bosques como de océanos puede variar en las diferentes regiones del mundo: los bosques tropicales tienen una capacidad de secuestro diferente a la de un bosque templado, y se sabe que, con relación al océano, algunas partes del mundo funcionan en promedio más como fuente de emisión de CO₂ que como sumidero (caso de la costa oeste de Baja California)³².

Por esta razón, resultaría conveniente realizar el cálculo de la CCO_{CO2}, con base en las capacidades reales de secuestro de los bosques y océanos de México y de cada país. Podría calcularse esta también a nivel estado, para coadyuvar en la realización de los programas estatales de mitigación de los efectos del cambio climático, dentro del marco del Programa Especial de Cambio Climático 2008 – 2012 del gobierno federal, lo que permitiría identificar con mayor detalle los recursos potenciales de secuestro de carbono y/o la necesidad de contar con ellos. Desafortunadamente, hace falta mucha información al respecto, por lo que se plantea la necesidad de orientar los esfuerzos hacia la estimación de las fuentes y sumideros naturales a nivel estado.

³² Un estudio de variabilidad espacial y temporal del flujo de CO₂ océano-atmósfera en la costa oeste de Baja California de J. Martín Hernández (Hernández *et al*, 2009), señala que existe una variación temporal muy clara en el cual el sistema cambia de ser un sumidero de CO₂ durante primavera-verano, a ser una fuente el resto del año, sin embargo, el autor concluye que la diferencia de ambas épocas sugiere que el sistema se comporta como una fuente neta hacia la atmósfera.

5) Se determinó el nivel de sustentabilidad de las dos tecnologías de producción de acero principales en México, calculándose para ellas la cantidad de energía que consumen y las emisiones de CO₂ que generan, y se concluyó que, por superar la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra, se consideran no sustentables.

Para el caso de la tecnología de producción de acero BF + BOF, la MEMAC demostró, que la cantidad de emisiones de CO₂ por megajoule de energía consumida, que se emite cada vez que se producen 1000 kilogramos de acero comercial, es más de 3 veces la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra evaluada para México (CCO_{CO2}), lo que quiere decir, que por cada tonelada producida el 67.8% de sus emisiones de CO₂ (2,088.4 kg) se adicionan a las ya existentes en la atmósfera.

En el caso de la tecnología DRI + EAF, la MEMAC demostró, que cada vez que se producen 1000 kilogramos de acero comercial la cantidad de emisiones de CO₂ por megajoule de energía consumida, supera 1.97 veces la capacidad de carga de los sumideros de carbono de la Tierra evaluada para México (CCO_{CO2}), por lo que, por cada tonelada producida, el 49.2% (457.4 kg) de las emisiones de CO₂ se agregan al total existente en la atmósfera.

Llevando los anteriores resultados al ámbito de la vivienda en México, observamos lo siguiente: si consideramos que en promedio, una vivienda de interés social puede demandar alrededor de 14 kg de acero por metro cuadrado construido³³, con la información que ya se ha calculado podemos decir que, durante la etapa de Producción de dicho acero, se pueden generar entre 13 y 43 kg de CO₂ por metro cuadrado, dependiendo de la tecnología de acero de donde provenga este.

³³ De acuerdo con datos analizados de viviendas de interés social tipo en el estado de Nayarit, las cuales utilizan en su construcción: zapatas de concreto armado en cimentación, muros de tabique y losa de concreto armado.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI, 2008a: 11), se construirán 650 mil viviendas al año hasta el 2030, sumando cerca de 42 millones de nuevos hogares. Si consideramos un promedio de 60 metros cuadrados por vivienda, lo anterior representa, entre 507,000 y 1'677,000 toneladas de CO₂ por año, sólo por los procesos que involucra la Producción de acero, lo que equivale a la acción de secuestro de carbono de entre 669,000 y 2'213,000 hectáreas de bosques cada año (equivalente a un área de entre 82 y cerca de 148 kilómetros cuadrados de bosques).

Es necesario analizar el resto de materiales de construcción que se usan en la edificación (al menos, los más comunes), para conformar una base de datos de energía incorporada y emisiones de CO₂ relacionadas, la cual podrá utilizarse para establecer comparativos entre ellos y a nivel de sus procesos. Cuando se cuente con una base de datos suficiente, se estará en condiciones de evaluar el nivel de sustentabilidad de una futura edificación desde la etapa del proyecto, visualizando desde esa etapa, la posible carga ambiental que representaría para el ambiente la propuesta de diseño considerada. Lo anterior podría a su vez, proporcionar argumentos sólidos para normar la edificación en México en términos de la sustentabilidad de los materiales de construcción durante sus etapas de producción.

Una base de datos de GEE_{CO₂} de materiales de construcción, puede facilitar la evaluación del nivel de sustentabilidad de sistemas constructivos completos, de elementos constructivos en una edificación tipo (cimentación, estructura, albañilería, acabados, etc.), y el análisis de la edificación por metro cuadrado de construcción, entre otras posibilidades. Sistematizando lo anterior, podría convertirse en un software que auxilie el diseño de la edificación sustentable en México.

6) Ante la necesidad imperiosa de lograr un desarrollo sustentable, el presente trabajo de investigación, propone de manera cuantitativa límites a la emisión de CO₂ por unidad de energía utilizada e identifica objetivos de reducción de emisiones de CO₂; el intervalo de capacidad de carga de CO₂ calculado para México (CCO_{CO2}), establece ese límite, donde las acciones pueden conducir hacia un desarrollo verdaderamente sustentable.

Los países que forman parte del no Anexo I del Protocolo de Kioto (en el que se incluye México), no están obligados a una reducción de emisiones específica³⁴; sin embargo, dicho Protocolo exhorta a estos países a que orienten sus esfuerzos a lograr un desarrollo sustentable, para lo cual establece mecanismos de reducción de emisiones de gases causantes del calentamiento global (gases de efecto invernadero), que posibilitan la obtención de fondos económicos para sus propios proyectos de mitigación. Dentro de estos mecanismos de reducción, se encuentran los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL); estos contemplan la participación de países no-Anexo I en el comercio de emisiones, como vendedores de Certificados de Reducción de Emisiones (CER, por sus siglas en inglés)³⁵ sustentados en proyectos de mitigación registrados. En este sentido, México ha hecho muy buen papel en el plano internacional, ya que, en el 2008, según el reporte: *Clean Development Mechanism*, publicado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), México ocupó el tercer lugar mundial después de China y Brasil, en cantidad de proyectos registrados, por lo que tiene un gran potencial para obtener CERs, y como consecuencia, para hacerse llegar de incentivos económicos y financiar así sus acciones de desarrollo sustentable.

³⁴ En 2005 entró en vigor el acuerdo internacional llamado Protocolo de Kioto, el cual tiene por objetivo reducir la emisión a la atmósfera de seis gases de efecto invernadero. Se obtuvo el compromiso para las partes incluidas en el Anexo I, de reducir las emisiones mencionadas en un porcentaje aproximado de 5% en promedio dentro del periodo que va desde el 2008 al 2012, en comparación a las emisiones del año 1990.

³⁵ Un CER equivale a una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera, y puede ser vendido en el mercado de carbono a países Anexo I (Industrializados, según la nomenclatura del Protocolo de Kioto).

Cualquier reducción de emisiones cuenta y vale para los efectos mencionados, y el esfuerzo a nivel internacional que México ha hecho de reducción de emisiones es muy loable. Sin embargo, con relación a la capacidad que tiene la Tierra para absorber y asimilar las emisiones causantes del calentamiento global, el compromiso de México debe ir mucho más allá. Una reducción de emisiones que rebase dicha capacidad natural de la Tierra, como ya se mencionó en la introducción del presente documento, contribuye a poner en riesgo la estabilidad climática del planeta; la Tierra tiene un límite, el cual marca el punto de equilibrio entre la acción del hombre y las capacidades naturales con que esta cuenta.

En el caso de la producción de acero en México, el objetivo de reducción depende de la tecnología que analicemos. Para la tecnología BF + BOF, la cantidad de emisiones estimada fue de 3,080.3 kg de CO₂; sin embargo, de acuerdo con lo calculado, es necesaria una reducción en las emisiones de CO₂ de 67.8%. Por lo tanto, el objetivo de reducción sería dejar de emitir cuando menos 2,088.4 kg de CO₂ a la atmósfera por cada tonelada de acero producida; en términos de la sustentabilidad ya comentada, no se puede ir más allá del límite máximo de emisiones que permite la capacidad de la Tierra, que sería para este caso: 991.9 kg de CO₂ por tonelada de acero producida.

La cantidad de emisiones de CO₂ que genera la producción de una tonelada de acero con la tecnología DRI + EAF, es de 929.62 kg de CO₂; de acuerdo con lo calculado, el porcentaje que rebasa la capacidad de los sumideros de carbono de la Tierra es de 49.2%. Por lo tanto, el objetivo de reducción de emisiones sería igual a 457.4 kg de CO₂, ya que el límite máximo de emisiones que la Tierra puede secuestrar, se encuentra en 472.22 kg de CO₂. Cualquier cantidad de emisiones por arriba de este límite durante la producción de una tonelada de acero comercial, contribuye a romper el equilibrio con la capacidad de carga de la Tierra.

Hacia el interior de la producción de acero, la MEMAC permite identificar por etapas y procesos, los focos rojos en la cantidad de emisiones de CO₂, así como objetivos de reducción acordes con la capacidad de carga de nuestro planeta. Dentro de la tecnología BF + BOF, la mayoría de las emisiones de CO₂ se generan durante la etapa de Producción del acero, mismas que alcanzan el 86.7% del total del sistema. El proceso de Horno de Coque, es responsable del 46.2% de las emisiones de CO₂ de esta etapa de Producción y del 40.1% del total del sistema. El GEE_{CO2} de la etapa de Producción es 0.09568 y es más alto que el GEE_{CO2} de todo el sistema; el objetivo de reducción de esta etapa por lo tanto, debe ser de por lo menos el 69.5% de las actuales emisiones, lo que equivale a 1,856.9 kg de CO₂. El proceso de Horno de Coque deberá reducir sus emisiones de CO₂ como mínimo un 71.3% si aspira a ser sustentable, lo que equivale a una reducción de 880.7 kg de CO₂ con respecto a las actuales.

En la tecnología DRI + EAF, sobresale la etapa de Producción de acero con el 87.7% del total de emisiones de CO₂. El proceso de Reducción Directa del Acero es el de mayor contribución de CO₂ durante la etapa de Producción y en el sistema, con un 34.1% y 40.7% respectivamente. Los objetivos principales de reducción de emisiones de CO₂ serían: un 47.9% (390.58 kg de CO₂) cuando menos en la etapa de Producción, y un 50.5% (191.1 kg de CO₂) como mínimo en el proceso de Reducción Directa del Acero.

Ante los objetivos de reducción planteados, uno de los caminos viables de seguir es mejorar la calidad de la energía que se utiliza, esto es, incrementar la cantidad de energías renovables y disminuir el consumo de combustibles fósiles, lo cual requiere del esfuerzo conjunto y decidido de la industria, el gobierno y la sociedad. El resultado de este esfuerzo es determinante en el logro de los objetivos de reducción planteados, y es decisivo para el futuro próximo de nuestro planeta.

7) Con el desarrollo de la MEMAC, se intenta dar pasos hacia adelante en el fortalecimiento de bases que permitan la evaluación integral de la sustentabilidad de la edificación en México; se han desarrollado ya normas, códigos, documentos y programas, entre otros que han logrado avances verdaderamente trascendentales, algunos de ellos son: Atlas del bioclima de México (Morillón, 2004); Manual de recomendaciones bioclimáticas para el diseño urbano y arquitectónico (Morillón, 2005); Guías para la eficiencia energética de agua y manejo de áreas verdes en la vivienda (CONAVI); Código de edificación y vivienda (CONAVI, 2007); Criterios e indicadores para desarrollos habitacionales sustentables (CONAVI, 2008b); Software: Ecotecnologías para viviendas de interés social en México; Normatividad Oficial Mexicana para la eficiencia energética en edificios (NOM-008-ENER-2001: Eficiencia energética en edificaciones, “Norma para la envolvente de edificios no residenciales”, NOM-020-ENER en anteproyecto: Eficiencia energética en edificaciones, “Norma para la envolvente de edificios residenciales”); Programa La Casa Nueva / La Comunidad Nueva de la SENER; Programa de Vivienda Sustentable de la CONAVI; Programa de adecuación térmica y energética en la vivienda (CFE): ASI-FIPATERM y FIDE; Hipoteca verde de INFONAVIT; Programa específico para el desarrollo habitacional sustentable ante el cambio climático: CONAVI-SEMARNAT-SENER; Programas gubernamentales para la sustentabilidad de la vivienda (CFE: PAESE-FIDE, CONAE-SENER y CONAFOVI); entre muchos otros esfuerzos. Sin embargo durante las primeras etapas de vida de la edificación (producción de materiales de construcción) no existen muchos avances. La presente herramienta metodológica representa una propuesta que puede servir de base para la evaluación de la sustentabilidad de la edificación en México.

BIBLIOGRAFÍA

International Energy Agency, (2007): “Key World Energy Statistics 2008”. Paris: IEA, disponible en:

http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1199
[Accesado el día 03 de noviembre de 2008].

International Energy Agency, (2008): “Key World Energy Statistics 2008”. Paris: IEA, disponible en:

http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1199
[Accesado el día 15 de febrero de 2009].

Amador Hernández, J. C., (2009): “Crisis económica y la política contracíclica en el sector de la construcción de vivienda en México”, *Cámara de Diputados, LX Legislatura*. Reporte CESOP No. 65, Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública de la Cámara de Diputados de la LX Legislatura, disponible en: http://www3.diputados.gob.mx/camara/content/download/213394/529464/file/Crisis_economica_construccion_vivineda_docto65.pdf, [Accesado el día 15 de Abril de 2009].

Arena, P., (2005): “Análisis del ciclo de vida y la sustentabilidad ambiental del sector edilicio en Argentina”, Caldeira-Pires, A. (org.), *A Avaliação do ciclo de vida: a ISO14040 na America Latina*. Brasília: Sindicato Nacional Dos Editores de Livros, RJ.

Arenas Cabello, F. J., (2008): “Los Materiales de Construcción y el Medio Ambiente”, *Medio Ambiente y Derecho. Revista electrónica de derecho ambiental*. Número 17, Junio de 2008, disponible en: <http://www.cica.es/aliens/gimadus/>, [Accesado el día 21 de agosto de 2008].

Altos Hornos de México SA, (2007): “Reporte Anual de 2007”, *AHMSA*. Información financiera. Monclova, Coahuila, disponible en: http://www.ahmsa.com/Acero/Empresa/Financieros/AHMSA_Informe_Anual_2007.pdf, [Accesado el día 13 de marzo de 2008].

Blanchard, S. y P. Reppe, (1998): “Life Cycle Analysis of a Residential Home in Michigan”, *Center for Sustainable Systems*. Report No. CSS98-05, September, 1998, Michigan: University of Michigan, disponible en: http://css.snre.umich.edu/css_doc/CSS98-05.pdf, [Accesado el día 10 de noviembre de 2008].

Braungart M. y W. McDonough, (2005): *Cradle to cradle*. Madrid: Mc Graw Hill.

Boff, L. (ed), (2008): “¿Cuándo comenzó nuestro error?”, *Leonardo Boff*. Artículos: 2008, Brasil, disponible en: <http://leonardoboff.com/site-esp/lboff.htm>, [Accesado el día 13 de diciembre de 2008].

Building Information Foundation RTS, (2000): “The Environmental Declarations of Building Products in Finland”, *RTS*, Helsinki, disponible en: <http://www.rts.fi/english.htm>, [Accesado el día 15 de abril de 2009].

Canada Mortgage and Housing Corporation, (2004): “Environmental Framework, Energy Related, Environmental, Impact of Buildings”, *IEA Annex 31*, disponible en: http://www.greenbuilding.ca/annex31/core_reports.htm, [Accesado el día 25 de noviembre de 2008].

Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, (2008): “Perfil de la Industria Siderúrgica en México”, *CANACERO*, disponible en: <http://www.canacero.org.mx/>, [Accesado el día 13 de enero de 2008].

Centro Mario Molina (2008): *Mitigation Strategies for Greenhouse gases on Cement Sector*, CMM, Distrito Federal, México.

Cobas, Elisa, (2002): *Life Cycle Inventory of Concrete, Asphalt and Calyeso Roads at Tamuín, S.L.P.*, CEMEX, Monterrey, México.

Conway, N., (1999): “Case study: Economic Input-Output Life Cycle Assessment of Asphalt versus Steel Reinforced Concrete for Pavement Construction”, *Carnegie Mellon University*, Pittsburgh, disponible en:
<http://www.ce.cmu.edu/GreenDesign/gd/education/Eio.pdf>, [Accesado el día 12 de enero de 2008].

Comisión Independiente sobre la Población y la Calidad de la Vida, (1999): *Elegir el futuro. Un programa radical para la mejora sostenible de la Calidad de Vida*, Fundación Santa María/IEPALA, Madrid.

Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, (2007): *Estrategia Nacional de Cambio Climático*, SEMARNAT, Distrito Federal, México.

Comisión Nacional del Medio Ambiente, (2001): “Guía Metodológica – Estudio de Ciclo de Vida ECV”, *Gobierno de Chile*, CONAMA, disponible en:
<http://www.conama.cl/portal/1301/channel.html>, [Accesado el día 20 de mayo de 2008].

Comisión Nacional de Vivienda, (2007), *Código de edificación de vivienda*, CONAVI, Distrito Federal, México.

Comisión Nacional de Vivienda, (2008a): *Programa Nacional de Vivienda 2007-2012, Hacia un Desarrollo Habitacional Sustentable*, Distrito Federal, México.

Comisión Nacional de Vivienda, (2008b): *Criterios e Indicadores para Desarrollos Habitacionales Sustentables*, CONAVI, Distrito Federal, México.

Crawford, Robert, (2005): “An assessment of the energy and water embodied in commercial building construction”, *School of Architecture and Building*, Deakin University, Australia.

Cuchí B., Albert, (2005): “Ambientalización Curricular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la UPC”, *Revista Ide @Sostenible*, No. 10, disponible en: <http://hdl.handle.net/2099/223>, [Accesado el día 4 de febrero de 2008].

Cuchí B., Albert y Sagrera, Albert: (2007), “Reutilización y Reciclaje de los residuos del sector de la construcción”, *Revista Ambienta*, Mayo-2007, Ministerio del Medio Ambiente, disponible en: http://www.mma.es/secciones/biblioteca_publicacion/publicaciones/revista_ambienta/n66/pdf/59reciclaje662007.pdf, [Accesado el día 26 de febrero de 2008].

Duarte, Carlos M., (2006): *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Echeverría, M. y Capuz, S., (2008): “Geografía el mundo contemporáneo, El desequilibrio entre población y recursos”, *Planeta Sedna*, disponible en: <http://www.portalplanetasedna.com.ar/poblacion02.htm>, [Accesado el 4 de enero de 2009].

Edwards, Brian, (2005), *Guía Básica de la Sostenibilidad*, ed. G.G, Madrid.

European IPPC Bureau, Integrated Pollution Prevention and Control, (2001): *Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel*, IPPC, Sevilla.

European IPPC Bureau, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), (2008): *Draft Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Iron and Steel*, IPPC, Sevilla.

Global, Carbon Project, (2008): “Carbon Budget 2007”, GCP, disponible en: www.globalcarbonproject.org , [Accesado el día 30 de abril de 2008].

Gómez Orea, D. (1998) *Evaluación de Impacto Ambiental*. 3ª Edición (corregida y aumentada). Ed. Agrícola Española, S.A. Madrid. 260 pp. ISBN 84-85441-31-1

Hernández A., J. M. *et al*, (2009): *Variabilidad Espacial y Temporal del Flujo de CO2 Océano-Atmosfera en la Costa Oeste de Baja California, México*, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B.C.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2007): “La Industria Siderúrgica en México, Serie de Estadísticas Sectoriales”, *INEGI*, disponible en: http://www.inegi.gob.mx/lib/busador/busqueda.aspx?s=prod_serv&textoBus=la%20industria%20siderurgica%20en%20mexico&e=&seccionBus=bd, [Accesado el 27 de junio de 2008], [Accesado el día 3 de noviembre de 2008].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2000): “Censo general de población y vivienda 2000, Hogares”, *INEGI*, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>, [Accesado el día 4 de marzo de 2009].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2000): “Censos de Población y Vivienda, 1950 – 2000”, *INEGI*, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx> [Accesado el día 15 de julio de 2008].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2004): “Censos Económicos 2004, Transportes Correo y Almacenamiento”, *INEGI*, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>, [Accesado el día 26 de febrero de 2008].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2005): “Censos de Población y Vivienda, 1995 y 2005”, *INEGI*, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>, [Accesado el día 15 de febrero de 2008].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2007): “La Industria Siderúrgica en México, Serie de Estadísticas Sectoriales”, *INEGI*, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>, [Accesado el día 15 de febrero de 2008].

Instituto Nacional de Ecología, (2008): “Glosario de términos de cambio climático”, *INE*, disponible en: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/glosario.html, [Accesado del día 26 de febrero de 2008].

Instituto Nacional de Ecología – Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2005): *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2002*, Parte I Energía- Fuentes Fijas, SEMARNAT-INE, Distrito Federal, México.

Instituto Nacional de Ecología - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2006): *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*, SEMARNAT-INE, Distrito Federal, México.

International Aluminum Institute (2003): “Life Cycle Assessment of Aluminum: Inventory Data for the Worldwide Primary Aluminum Industry”, *IAI*, Proceso y Reciclaje del Aluminio para la conservación de la energía y la sustentabilidad, Capítulo IV, disponible en: www.world-aluminium.org, [Accesado el día 3 de noviembre de 2008].

IRAM-ISO 14040, (1998): *Gestión ambiental, Análisis del ciclo de vida, Principios y marco*, Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Juannila, S., et al, (2006): “Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States”, *ASCE Research Library*, disponible en: <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?0601096>, [Accesado el día 3 de noviembre de 2008].

Kofoworola, O.; Gheewala, S., (2008): “Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 13, Number 6, Springer Berlin / Heidelberg, disponible en: <http://www.springerlink.com/content/n1856444n29v16j4/>, [Accesado el día 5 de enero de 2009].

Ludevid Anglada, Manuel, (1998): *El cambio global en el medio ambiente. Introducción a sus causas humanas*, Alfaomega, Distrito Federal, México.

Naciones Unidas, (1992): “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático”, *CMNUCC*, Nueva York, disponible en: http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php, [Accesado el día 3 de noviembre de 2008].

NMX-SAA-14040-IMNC-2008, (2008): *Gestión Ambiental-Análisis de Ciclo de Vida-Principios y Marco de Referencia*, IMNC, Distrito Federal, México.

NMX-SAA-14044-IMNC-2008 (2008): *Gestión Ambiental-Análisis de Ciclo de Vida-Requisitos y Directrices*, IMNC, Distrito Federal, México.

Morillón, D., (2004): *Atlas del bioclima de México*, II-UNAM, México.

Morillón, D. (2005): *Recomendaciones bioclimáticas para el diseño arquitectónico y urbano*, Comisión Federal de Electricidad y Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico, México.

Meadows, D., (2006): *Los límites del crecimiento, 30 años después*. Barcelona: Galaxia Gutenberg – Círculo de Lectores.

Odum Eugene, Warret Gary, (2006): *Fundamentos de Ecología*, quinta edición, Distrito Federal, México: Thomson.

Observatorio de la Sostenibilidad en España, (2007): “Sostenibilidad en España 2007”, OSE, disponible en:
<http://www.sostenibilidad-es.org/NR/rdonlyres/EDB4D6A2-D1C9-4D17-94E2-1C2BA1A6AF9C/2582/56Intensidaddecarbonodelaindustria.pdf>, [Accesado el día 21 de abril de 2009].

Observatorio de la Sostenibilidad en España, (2009): “Incidencia ambiental de los materiales de construcción en su ciclo de vida”, OSE, disponible en:
<http://www.sostenibilidad-es.org/Observatorio+Sostenibilidad/esp/plataformas/urbana/temas/Edificacion/Ciclo+de+Vida/Ciclo+de+vida+de+los+materiales/>, [Accesado el día 10 de junio de 2009].

Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, (2006): *Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, IGES, Japón.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, (2007): *Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York.

Piccinelli Bocchi, G. y Sunyer Martín, P., (2008), “El debate sobre el desarrollo sostenible”, *Matices, Revista de Posgrado*, UNAM, Facultad de Estudios Superiores - Aragón, México, enero-abril, No. 5.

Population Information Program, (1997): “Capacidad de carga”, *The Info Project, Population Reports*, Volumen XXV, número 4, Serie M, No. 13, disponible en: http://www.infoforhealth.org/pr/prs/sm13/sm13chap1_5.shtml, [Accesado el día 11 de febrero de 2009].

Randolph, Bill et al, (2007), “The Environmental Impacts of Residential Development: Case Studies of 12 Estates in Sydney”, *City Futures Research Centre*, Faculty of the Built Environment, University of New South Wales, disponible en: <http://www.fbe.unsw.edu.au/cf/publications/cfprojectreports/attachments/FinalLandcomEnergyandWaterReport.pdf>, [Acceso del 16 de marzo de 2008].

Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, (2008): “Resumen Ejecutivo BREF Metalurgia Férrica”, *EPER-ESPAÑA*, disponible en: <http://www.eper-es.es/ver.asp?id=1046&Doc=1111&index=6>, [Accesado el día 4 de febrero de 2009].

Rodríguez T., Lilia y Ruíz S., Daniel (2001): “El concepto de capital natural en los modelos de crecimiento exógeno”. *Análisis Económico*, segundo semestre, vol. XVI, número 033, Universidad Autónoma Metropolitana – Atzacapozalco, Distrito Federal, México.

Romero R., Blanca I., (2003): “El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental”, *Boletín IEE, Instituto de Investigaciones Eléctricas*, Cuernavaca, Morelos, disponible en: <http://www.iie.org.mx/boletin032003/tend.pdf>, [Accesado el día 27 de marzo de 2008].

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2003): “Comparativo entre los diferentes modos de transporte”, SCT, Estadísticas Básicas 2003, Estadísticas básicas del autotransporte federal, disponible en:
http://dgaf.sct.gob.mx/fileadmin/EST_BASICA/EST_BASICA_2003/comparativo.pdf, [Accesado el día 4 de febrero de 2009].

Secretaría de Economía - Coordinación General de Minería, (2008): “Anuario Estadístico de Minería Mexicana Ampliada 2007”, CGM, disponible en:
http://www.coremisgm.gob.mx/productos/anuario/Capitulo_II.pdf, [Accesado el día 21 de agosto de 2008].

Secretaría de Energía, (2006): *Balance Nacional de Energía 2005*, SENER, Distrito Federal, México.

Secretaría de Energía, (2007): *Balance Nacional de Energía 2006*, SENER, Distrito Federal, México.

Secretaría de Energía, (2008): *Balance Nacional de Energía 2007*, SENER, Distrito Federal, México.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2008): *Criterios de evaluación de impacto ambiental*, SEMARNAT, disponible en:
<http://www.semarnat.gob.mx/xfocalizada/impacto/Paginas/criterios.aspx>, [Accesado el día 26 de septiembre de 2008].

Seo, Seongwon, (2001): “Estimation of CO₂ emissions in life cycle of residential buildings”, *Journal of construction engineering and management*, Septiembre- Octubre, disponible en: <http://pubs.asce.org>, [Accesado el 19 de abril de 2009].

Suppen, Nydia, (2005a): “La serie ISO-14040, Análisis de ciclo de vida”, *Una evaluación para el ciclo de vida: una ISO 14040 para América Latina*, Sindicato Nacional dos Editores de Livros, Jr. Brasilia, Brasil.

Suppen Nydia, (2005b): *Conceptos básicos del análisis del ciclo de vida y su aplicación en el ecodiseño*, Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable, Estado de México.

Suzuki, Michiya; Oka, Tatsuo, (1998): “Estimation of life cycle energy consumption and CO₂ emission of office buildings in Japan”, *SBIS*, disponible en: www.sbis.info, [Accesado el día 20 de Enero de 2009].

Treloar, Graham, (1998): *A comprehensive embodied energy analysis framework*, Tesis de Doctorado, Faculty of Science and Technology, Deakin University, Australia.

Trusty, W. y Meil, J., (2002): “Building life cycle assessment: residential case study”, *ATHENA, Sustainable Materials Institute*, disponible en: <http://www.athenasmi.ca>, [Accesado el día 12 de enero de 2009].

Tucker, S, et al, (1998): “A 3D CAD model of embodied energy for assessment of sustainable construction”, *SBIS*, disponible en: www.sbis.info, [Accesado el 20 de Enero de 2009].

UNFCCC, (2008): “Clean Development Mechanism, in Brief 2008”, en *UNFCCC*, disponible en: http://unfccc.int/resource/docs/publications/08_cdm_in_brief.pdf, [Accesado el 28 de septiembre de 2009].

Urtega, Luis, (1999): “Sobre la Noción de Recurso Natural”, *Edición electrónica de trabajos publicados sobre geografía y ciencias sociales de la Universidad de Barcelona*, Barcelona, pp. 441-454, disponible en:
<http://www.ub.es/geocrit/sv-90.htm>, [Accesado el día 22 de octubre de 2009].

Vázquez E., Mariano, (2001): “Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales”, *Boletín CF + S 20*, disponible en:
<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n20/amvaz.html>, [Accesado el día 3 de noviembre de 2008].

World Resources Institute, (2008): “Climate Analysis Indicators Tool”, *WRI*, disponible en <http://cait.wri.org/cait.php>, [Accesado el día 12 de abril de 2009].