



INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE



Certificación ISO 9001:2008 Ú

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES GENERADAS POR LA ACTIVIDAD AÉREA EN MÉXICO

**Alfonso Herrera García
Newton Alfredo Vales Cordero**

**Publicación Técnica No. 384
Sanfandila, Qro, 2013**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Estimación de las emisiones de gases contaminantes
generadas por la actividad aérea en México**

Publicación Técnica No. 384
Sanfandila, Qro, 2013

Este trabajo fue realizado en el Instituto Mexicano del Transporte, por el investigador titular de la Coordinación de Integración del Transporte (CIT), Dr. Alfonso Herrera García, y por el tesista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, M. en I. Newton Alfredo Vales Cordero.

Los autores agradecen los comentarios, sugerencias y apoyo del Coordinador de la CIT, Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue.

Contenido

Contenido	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
1 Introducción	1
1.1 Justificación	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Alcances	5
1.4 Metodología	5
2 Antecedentes	7
2.1 Generalidades	7
2.2 Emisiones contaminantes en México	8
2.3 Adaptación en el largo plazo para minimizar las consecuencias adversas del cambio climático	10
2.4 Calculadora de emisiones de carbono de la Organización de la Aviación Civil Internacional	11
2.4.1 Metodología utilizada por la calculadora de la OACI	14
2.4.2 Sensibilidad de la calculadora de la OACI	16
3 Características operativas	19
3.1 Fuente de información	19
3.2 Compañías aéreas que operaron en México en 2010	19
3.3 Combustibles de aviación	22
3.3.1 Turbosina	22
3.3.2 Gas avión	23
3.3.3 Relación de la cantidad de emisiones de gases contaminantes por litro de combustible	23
3.4 Antigüedad de las aeronaves	24
4 Metodologías para estimar las emisiones	25
4.1 Primera estimación, con base en el consumo de combustible	25
4.1.1 Resultados de la metodología	27
4.2 Segunda metodología	28
4.2.1 Identificación de los aeropuertos de origen y destino	28
4.2.2 Delimitación de las coordenadas geográficas	29
4.2.3 Consumo de combustible unitario	30
4.2.4 Resultados obtenidos	30
5 Medidas para atenuar los impactos de los GEI generados por la actividad aérea	33
5.1 Medidas internacionales	33
5.2 Los combustibles alternos	35
5.2.1 Producción de bioturbosina a partir de la jatropha	38
5.2.2 Características y normas de los biocombustibles	39
5.3 Huella de carbono en unidades de terreno forestal	40

6 Conclusiones y recomendaciones	43
Bibliografía	47
Anexo 1	51

Resumen

En este trabajo se estimaron las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México durante 2010. Además, se señalan algunas medidas para atenuar los impactos de éstas. Para los cálculos se propusieron dos metodologías, en la primera se realizó una estimación con base en el consumo de combustible y en la segunda, con base en los vuelos registrados y los tipos de aeronaves utilizados. Adicionalmente, en esta última estimación mediante un sistema de información geográfica, se determinó sobre qué superficie se produjeron las emisiones.

Los resultados, presentados mediante tablas y figuras, indican que en 2010 se generaron 8.2 Mt de CO₂, 4.4 kt de SO_x y 86.7 kt de NO_x. Además, se estimó que la mayor cantidad de emisiones se generó en los vuelos internacionales (65%). En cuanto a las zonas sobre las que se generó el CO₂, la mayor parte correspondió al territorio nacional (54%), después, le siguieron en importancia las aguas oceánicas (21.7%) y Norteamérica (18.5%). También, se determinó que para neutralizar la huella de carbono, se podría aplicar un impuesto con un monto promedio de 1.14 dólares por pasajero; y que los biocombustibles pueden reducir esta huella hasta en 80%, considerando todo su ciclo de vida.

Palabras clave: actividad aérea, biocombustible, CO₂, emisión, huella de carbono, sistema de información geográfica.

Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

Abstract

In this research, the air pollution emissions generated by the air transport movements during 2010 were estimated. In addition, some measures to reduce the emission impacts were established. For the calculations two methodologies were proposed, the first one performed the estimations considering the fuel consumption, and the second methodology considering the reported flights and the aircraft types used. Additionally, in the second estimation using a geographic information system, the surface where the emissions were ejected was determined.

According to the results, showed using tables and figures, it was estimated that during 2010, 8.2 Mt of CO₂, 4.4 kt of SO_x and 86.7 kt of NO_x were generated. Besides, it was estimated that the greatest amount of emissions was generated by the international flights (65%). In regard to the zones where the CO₂ was ejected, the greatest amount corresponded to the national territory (54%), followed in importance by the oceanic waters (21.7%) and North America (18.5%). Also, it was determined that in order to neutralize the carbon footprint it is possible to apply a fee with an average value of 1.14 dollars per passenger; and that the biofuels can reduce this footprint until 80%, considering all their life cycle.

Keywords: air transport movement, biofuel, carbon footprint, CO₂, emission, geographic information system.

Estimación de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea en México

Resumen ejecutivo

1 Introducción

En la actualidad el cambio climático se ha convertido en el problema ambiental global más importante debido a sus efectos. Por ello, es una de las principales problemáticas que deben atenderse en el ámbito internacional, regional y local. Se manifiesta con efectos negativos evidentes, los cuales continuarán en aumento mientras no se detenga el incremento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI). Enfrentar el cambio climático implica desarrollar de inmediato actividades de mitigación o reducción de emisiones de GEI, y de adaptación o reducción de la vulnerabilidad y de los riesgos para la vida.

Por lo tanto, resulta de interés estimar las emisiones contaminantes, con objeto de cuantificar objetivamente la dimensión de las afectaciones ambientales y, también, para identificar mecanismos que podrían utilizarse con objeto de internalizar dichas afectaciones.

México ha asumido el objetivo de disminuir en un 50% sus emisiones de GEI al 2050, respecto con las emitidas en el 2000. En nuestro país el sector transporte generó en 2006 el 20% del total nacional, de emisiones contaminantes, lo cual representó 144.6 Mt de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Las emisiones de GEI durante 2006 en México, por modo de transporte fueron: autotransporte, 135.0 MtCO₂e; aéreo, 5.4 MtCO₂e; ferroviario, 1.8 MtCO₂e; y marítimo, 2.4 MtCO₂e. Se debe remarcar la magnitud de las emisiones de GEI del modo aéreo, que es el segundo en importancia después del autotransporte, a pesar de que sólo contribuye con el 0.018% del movimiento de carga doméstica y 0.7% del movimiento doméstico de pasajeros.

El objetivo general fue realizar una estimación preliminar de las emisiones contaminantes en el aire producidas por la actividad aérea en México, durante 2010. Los objetivos específicos fueron: a) Identificar las principales metodologías desarrolladas, para estimar las emisiones de gases contaminantes. b) Establecer una metodología para determinar las emisiones de gases contaminantes en México. c) Estimar los niveles de gases contaminantes, y d) Proponer algún mecanismo para recuperar parte de los costos externos asociados con la contaminación del aire.

2 Antecedentes

El crecimiento de la actividad aérea va acompañado de un incremento en la generación de gases de efecto invernadero. En 2011 la actividad humana mundial

generó 34,000 Mt de CO₂, de éstas, 669 Mt fueron originadas por la aviación comercial mundial, lo que representa alrededor del 2% del total mundial.

Se supone que el potencial efecto negativo del incremento de las emisiones globales de CO₂ que genera la actividad aérea consolidará la presión pública y política para forzar a este sector a reducir las emisiones de estos gases. Dado que el transporte aéreo es un elemento vital para el desarrollo regional y la economía global, es necesario encontrar medios para transformar este servicio en una actividad sostenible. La sostenibilidad se debe entender como la capacidad de mantener un proceso desde la perspectiva ambiental, social y económica.

En el contexto mundial, México contribuye con alrededor del 1.6% a las emisiones de GEI, en 2006 éstas fueron de 715 MtCO₂e. En el rango de países emisores, se ubica en la posición número 13. Las emisiones per cápita de México en 2006, ascendieron a 6.2 tCO₂, este valor se encuentra en un nivel bastante próximo al promedio mundial.

La posición de México como país con desarrollo intermedio debe aprovecharse para adoptar opciones de desarrollo sustentable, con base en tecnologías limpias y bajas en carbono. Esta posición intermedia constituye una gran oportunidad para que México se mantenga indefinidamente en posiciones próximas a la trayectoria promedio global de emisiones per cápita, así como en línea con los requerimientos derivados de una meta global compartida.

La Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) desarrolló una calculadora para estimar las emisiones de dióxido de carbono que se generan por la actividad aérea. Su utilización es simple y requiere muy poca información. Aunque la calculadora de la OACI tiene muchas ventajas, se deben señalar algunos inconvenientes, por ejemplo, no estima la contaminación generada para un vuelo completo, sólo en forma individual por pasajero. Además, no considera en sus bases de datos algunos aeropuertos mexicanos. Debido a su estructura, tampoco desglosa, en el caso de los vuelos internacionales, las emisiones que corresponden al trayecto sobre México, sobre otro país o sobre aguas oceánicas.

3 Características de las aeronaves

En 2010 operaron veinte aerolíneas nacionales en México y utilizaron 308 aeronaves. De estas aeronaves, aproximadamente el 44.1% correspondió a la operación troncal, el 39.3% a la aviación regional, el 13.9% a las operaciones exclusivas de carga y 2.6% fueron operaciones de fletamento.

Se detectaron 25 modelos de aeronaves, ocho de ellas concentraron al 80 % de los equipos que ofrecieron servicio, los cuales fueron los siguientes: Boeing 737, Airbus A320, Embraer 145EP, Airbus A319, Boeing 717, Fokker, CRJ 600-2B19 y ATR-42.

Además de las compañías aéreas nacionales, durante 2010 operaron en México 62 aerolíneas extranjeras. La mitad de las cuales fueron aerolíneas de Norteamérica, 29% de Europa, 11.3% de Centroamérica y el Caribe, 8% de Sudamérica y 1.6% de Asia. En general se observó que los aviones más utilizados por estas compañías fueron los Airbus A319 y A320; y los Boeing B737 y B777; y en los vuelos con mayor radio de acción los B747.

En México sólo se utilizan dos combustibles de aviación, la turbosina y el gas avión. La turbosina es una mezcla de hidrocarburos parafínicos y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Se utiliza como combustible en motores de aviación a turbina. Por su parte, el gas avión es un líquido de alto octanaje obtenido a partir de la desintegración catalítica de los gasóleos pesados, que a su vez son un destilado intermedio del crudo. Se emplea como combustible en aviones de pistón.

Con base en una solicitud de información a Petróleos Mexicanos (PEMEX) se obtuvo la relación de gases contaminantes que se generan por cada litro de combustible quemado. Para la turbosina corresponden los siguientes valores: 2.036 kilogramos de CO₂, 0.0011 kilogramos de SO_x y 0.0215 kilogramos de NO_x. Para el gas avión los valores son: 2.536 kilogramos de CO₂, 0.0014 kilogramos de SO_x y 0.0268 kilogramos de NO_x.

4 Metodologías para estimar las emisiones

Se aplicaron dos metodologías para estimar las emisiones contaminantes generadas por la actividad aérea de México. En la primera se realizó la estimación en función del consumo de los combustibles fósiles. Esta primera estimación, considera los volúmenes de gases contaminantes generados por unidad de combustible quemada. En la segunda alternativa con base en los vuelos registrados y el tipo de aeronave que realizó cada vuelo, se estimaron los consumos de combustible y posteriormente las emisiones contaminantes. En este caso se estimó adicionalmente, sobre qué superficie se produjeron las emisiones, es decir, sobre territorio nacional o extranjero, o sobre aguas oceánicas.

Los resultados de la primera metodología señalan que en 2010 se generaron 6.62 millones de toneladas de CO₂, 3,582 toneladas de SO_x y 70,007 toneladas de NO_x.

Por otro lado, con base en la segunda metodología se estimó que el mayor porcentaje de gases contaminantes corresponde a las emisiones de dióxido de carbono (98.9%), después le sigue el óxido de nitrógeno (1.04%) y finalmente las emisiones de óxido de azufre (0.05%). Estas proporciones porcentuales corresponden a prácticamente los mismos valores que se obtuvieron mediante la primera metodología. Sin embargo, también se observó que en términos absolutos, las estimaciones de la segunda metodología para los tres gases

contaminantes considerados, presenta valores más altos (23.8%) que los obtenidos con la primera. Además, los resultados de la segunda estimación señalan que la mayor cantidad de emisiones de CO₂ corresponde a los vuelos internacionales (65%) y el resto a los vuelos nacionales (35%). En cuanto a las zonas sobre las que se generó el dióxido de carbono, la mayor parte corresponde al propio territorio nacional (54%). Después, le sigue en importancia la generación de CO₂ sobre aguas oceánicas (21.7%), Norteamérica (18.5%) y Sudamérica (3.3%).

5 Medidas para atenuar los impactos de los GEI generados por la actividad aérea

En relación con la disminución de las emisiones de CO₂, en el ámbito mundial se está trabajando en las siguientes áreas: mejora en la eficiencia de los combustibles, incremento del factor de ocupación de las aeronaves, acortamiento de las rutas aéreas, reducción de las demoras y construcción de aeronaves más ligeras.

Los objetivos de la International Air Transport Association (IATA) son: incrementar en 25% la eficiencia del combustible de las aeronaves para el año 2020; estabilizar el impacto ambiental y tener un crecimiento nulo de CO₂ a partir del año 2020; y reducir en un 50% las emisiones de CO₂ para el año 2050, en comparación con las generadas en 2005. Para ello, se están explorando diseños aerodinámicos radicales, la utilización de la energía solar en las aeronaves, la tecnología de células de combustible, y los biocombustibles sostenibles, que no compiten con los cultivos que sirven de alimento para el hombre.

Los combustibles alternos, en particular, los biocombustibles sostenibles, que han sido identificados por ofrecer soporte al logro de los objetivos establecidos para disminuir las emisiones contaminantes, provienen de cultivos de oleaginosas tales como la jatropha y la camelina, y de las algas, pero también, de la biomasa de la madera y desperdicios. Estas alternativas pueden reducir la huella de carbono hasta en un 80%, considerando todo su ciclo de vida.

Entre 2008 y 2011, al menos diez aerolíneas y varios fabricantes de aeronaves realizaron vuelos de prueba con distintas proporciones de biocombustible. Estas pruebas demostraron que el biocombustible es técnicamente confiable y que no se requieren hacer modificaciones a las aeronaves para su utilización, que puede ser mezclado con el combustible fósil y que en algunos casos los motores que lo utilizaron mejoraron su rendimiento. Desde de 2012 al menos 15 aerolíneas han realizado varios cientos de vuelos utilizando una mezcla de combustible fósil con biocombustible, obtenido de la jatropha, la camelina o de las algas. En todo el mundo grupos de inversionistas de aerolíneas y aeropuertos, fabricantes de aeronaves, gobiernos, productores y proveedores de biocombustibles están trabajando en forma conjunta para el desarrollo de los biocombustibles.

El 1 de abril de 2011, la aviación nacional dio el primer paso hacia el uso de biocombustibles al realizar el primer vuelo de demostración de un avión comercial con bioturbosina en México. Posteriormente, el mismo año Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) en coordinación con la línea aérea Aeroméxico y el fabricante de aeronaves Boeing, realizaron el primer vuelo transcontinental comercial de pasajeros en un avión de cabina ancha utilizando bioturbosina.

El principal reto para el desarrollo de los biocombustibles de aviación no es técnico, sino más bien comercial y político. Actualmente, esta alternativa es más costosa que los combustibles fósiles. Por ello, es necesario ofrecer incentivos a los inversionistas para desarrollar estas tecnologías.

Con base en los resultados de la segunda metodología, se estimó que la actividad aérea tiene una huella de carbono de 205,339.5 hectáreas de un bosque de encino-pino, considerando un factor de absorción de 40 tCO₂/ha. Esta superficie es equivalente a 2,053.3 km², lo que representa aproximadamente el 0.1% del total del territorio nacional.

También, se estimó que para neutralizar la huella ambiental se requeriría una inversión de aproximadamente 57.49 millones de dólares. Si este monto se distribuyera uniformemente entre cada uno de los 50.39 millones de pasajeros transportados desde, hacia o dentro nuestro país durante 2010, tendrían que haber pagado adicionalmente 1.14 dólares por realizar su viaje, lo cual no representa un incremento significativo del monto que pagan por su boleto de avión y los impuestos respectivos.

6 Conclusiones y recomendaciones

En los últimos años las emisiones mundiales de GEI se han incrementado significativamente, lo cual ha generado diversos efectos negativos, entre ellos el cambio climático. En México, el autotransporte representa el primer generador de estos gases contaminantes, sin embargo, le sigue en importancia el modo aéreo, a pesar de que su contribución en el transporte de pasajeros y el movimiento de carga es muy reducida. Sin embargo, el transporte aéreo es un elemento vital para el desarrollo regional y la economía global, por lo que es necesario encontrar medios para transformar este servicio en una actividad sostenible.

El principal gas contaminante que se genera por la combustión de cada litro de combustible de aviación es el dióxido de carbono. En particular, el gas avión es más contaminante que la turbosina, ya que por cada litro quemado, genera 24.5% más emisiones de dióxido de carbono que la turbosina.

La primera metodología propuesta es muy simple de aplicar, sólo utiliza la cantidad de combustible suministrada y aplica los factores de emisiones de gases contaminantes por cada litro de combustible quemado. Como resultado de esta

metodología se observó que prácticamente el 99% de las emisiones generadas corresponde a dióxido de carbono y un 1% a óxido de nitrógeno.

Debido a que la primera metodología se basa en el consumo total de combustible, sin considerar los diferentes tipos de aeronaves, ni las distancias de vuelo, es menos precisa que la segunda. De los resultados se infiere que la primera alternativa aparentemente subestima la cantidad de emisiones de CO₂ generadas. Por su parte, la segunda metodología, que considera varios factores adicionales en las estimaciones, ofrece teóricamente mayor precisión, sin embargo, su aplicación es más laboriosa.

Los resultados de la segunda metodología señalan que el 65% de las emisiones de CO₂ corresponde a los vuelos internacionales y el 35% a los nacionales. En cuanto a las regiones sobre las que se generaron los gases contaminantes, el 54% correspondió al territorio nacional.

En el ámbito mundial se han establecido diversas medidas y metas para atenuar los efectos ambientales de las emisiones de CO₂ generadas por la aviación. La meta a largo plazo es lograr un cero por ciento de emisiones de CO₂. Para ello, hoy en día se están explorando diseños aerodinámicos radicales, la utilización de la energía solar en las aeronaves, la tecnología de células de combustible y los biocombustibles sostenibles.

El principal reto para el desarrollo de los biocombustibles de aviación es comercial y político. Actualmente, esta alternativa es más costosa que los combustibles fósiles, por lo tanto, es necesario ofrecer incentivos a los inversionistas para desarrollar estas tecnologías.

Una estimación para el año 2010 de la huella de carbono generada por la actividad aérea de México señala que para neutralizarla se tendría que aplicar un impuesto con un monto promedio de 1.14 dólares por pasajero, lo cual no representa un incremento importante del monto que pagan normalmente los usuarios del transporte aéreo.

Es importante continuar con un seguimiento periódico que evalúe las emisiones contaminantes de la actividad aérea y los resultados de las medidas tomadas para reducirlas.

1 Introducción

1.1 Justificación

El cambio climático se ha convertido en el problema ambiental global más importante de la actualidad, debido a sus efectos estimados en el orden económico, político y social. Por ello, es una de las principales problemáticas que deben atenderse en el ámbito internacional, regional y local, abarcando todos los niveles de gobierno (PEF, 2009, p. i).

El Gobierno de México reconoce que el cambio climático constituye el principal desafío ambiental global de este siglo, y que representa, a mediano y largo plazos, una de las mayores amenazas para el proceso de desarrollo y el bienestar humano. Enfrentar el cambio climático implica desarrollar de inmediato actividades de mitigación, o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y de adaptación, o reducción de la vulnerabilidad y de los riesgos para la vida, para el orden natural y el desarrollo. Con objeto de evitar riesgos irreversibles para la sociedad y para los sistemas ecológicos, será necesario que las emisiones globales de GEI alcancen un máximo en los próximos diez años y se reduzcan a un tercio de su escenario tendencial en el año 2050. Por su índole y por su escala, las actividades y los procesos que pudieran asegurar ese resultado equivalen a una nueva Revolución Industrial.+(PEF, 2009, p. vii).

Por ejemplo, hasta hace unos años la utilización de las aeronaves no había causado preocupación como una fuente de emisiones que generan los GEI, debido a las enormes mejoras que se habían obtenido en la eficiencia de los motores de las aeronaves. Sin embargo, estudios a principios de los noventa mostraron que las emisiones de NOx de las aeronaves son un precursor significativo de GEI, dado que producen cerca de 35 veces el efecto de las emisiones generadas al nivel del suelo (Michaelis, 1996).

El mundo comienza a reducir la dependencia que tiene de los combustibles fósiles con el impulso del uso de fuentes de energía alternativas. Por ello, México ha demostrado un gran compromiso con la agenda internacional de medio ambiente y desarrollo sustentable, y participa en más de 90 acuerdos y protocolos vigentes, siendo líder en temas como cambio climático y biodiversidad. No obstante, el crecimiento económico del país sigue estrechamente vinculado a la emisión de compuestos de efecto invernadero (GR, 2013, p. 77).

Por lo anterior, el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, establece diversas líneas de acción (GR, 2013, p. 135), dentro de las que se encuentran:

“ Acelerar el tránsito hacia un desarrollo bajo en carbono en los sectores productivos primarios, industriales y de la construcción, así como en los servicios urbanos, turísticos y de transporte.

“ Promover el uso de sistemas y tecnologías avanzados, de alta eficiencia energética y de baja o nula generación de contaminantes o compuestos de efecto invernadero.

“ Realizar investigación científica y tecnológica, generar información y desarrollar sistemas de información para diseñar políticas ambientales y de mitigación y adaptación al cambio climático.

“ Contribuir a mejorar la calidad del aire y reducir emisiones de compuestos de efecto invernadero mediante combustibles más eficientes, programas de movilidad sustentable y la eliminación de los apoyos ineficientes a los usuarios de los combustibles fósiles.

En consecuencia, resulta de interés estimar las emisiones contaminantes en el aire, generadas por la operación aérea en México, para cuantificar objetivamente la dimensión de las afectaciones ambientales y para identificar mecanismos que podrían utilizarse con objeto de internalizar dichas afectaciones.

México ha asumido el objetivo de disminuir en un 50% sus emisiones de GEI al 2050, respecto con las emitidas en el 2000, esperando establecer un posible escenario de estabilización de las concentraciones de GEI, a un nivel no superior a 450 partes por millón de bióxido de carbono equivalente¹ (CO₂e), lo cual es *compatible con un límite del incremento de la temperatura superficial promedio entre 2°C y 3°C y una convergencia flexible hacia un promedio global de emisiones per cápita de 2.8 toneladas de CO₂e en 2050. En esta trayectoria deseable de reducción, las emisiones mexicanas tendrían que alcanzar un punto de inflexión en la segunda década de este siglo, para después descender paulatinamente hasta alcanzar el nivel indicado en 2050: aproximadamente 340 millones de toneladas de CO₂e (MtCO₂e)*+(PEF, 2009, p. viii).

El cambio climático es un problema mundial que se manifiesta con efectos negativos evidentes, los cuales continuarán en aumento mientras no se detenga el incremento de las concentraciones atmosféricas de GEI. *Para lograr una estabilidad en estas concentraciones, será preciso reducir, en forma drástica, las emisiones globales de estos gases. El cambio climático es resultado de la mayor falla de mercado de la historia², atribuible a que los distintos sectores económicos*

¹ Corresponde a las emisiones de GEI expresadas en unidades de potencial de calentamiento equivalente al CO₂.

² Stern, N. 2007, p. xviii: *El cambio climático es la mayor falla de mercado que el mundo haya nunca visto, e interactúa con otras imperfecciones de mercado. Tres elementos de política se requieren para una respuesta global eficaz. El primero es poner precio al carbono, a través de impuestos, comercio o regulaciones. El segundo es el conjunto de políticas para apoyar la*

nunca han internalizado los costos de las externalidades negativas derivadas de sus emisiones de GEI+(PEF, 2009, p. 1).

De acuerdo al PICC³, entre 1970 y 2004 las emisiones mundiales de GEI se han incrementado en un 70% (24% entre 1990 y 2004), pasando de 28.7 a 49 GtCO₂e/año+ (PEF, 2009, p. 3). Las emisiones per cápita de México se encuentran en la actualidad a un nivel bastante próximo al promedio mundial. Se espera que la población de México pase de 98.44 millones en el año 2000 a 121.86 millones en el año 2050 (Conapo, 2006⁴). Si nuestro país asumiera como meta indicativa para el año de referencia un emparejamiento con el promedio mundial de emisiones per cápita antes indicado, las emisiones mexicanas de GEI no deberían sobrepasar entonces los 339.4 MtCO₂e. Para alcanzar este nivel de emisiones a mediados de siglo se necesitaría una reducción de 47.3% respecto a las emisiones del año 2000, que se han estimado en 643.6 MtCO₂e+(PEF, 2009, p. 11).

Todos los estudios recientes sobre la economía del cambio climático coinciden en destacar que la mitigación que pudiera poner un límite razonable al incremento de la temperatura superficial promedio es costeable, se puede emprender con tecnologías ya conocidas, y sus costos serían muy inferiores a los denominados costos de inacción⁵+(PEF, 2009, p. 12). La actividad del transporte genera niveles significativos de emisiones de GEI, tanto en el ámbito mundial como en México. Por ejemplo, en nuestro país el sector transporte generó en 2006 el 20% del total nacional⁶, de emisiones contaminantes, lo cual representó 144.6 Mt de CO₂e. Las tendencias globales que se replican en México, muestran que el consumo de energía y las emisiones de GEI del sector transporte continuarán incrementándose en función del crecimiento económico. Este incremento provoca una mayor demanda derivada de combustibles y de infraestructura. A nivel mundial, este sector es donde más se dificulta el desacoplamiento entre las emisiones de GEI y el crecimiento económico+(PEF, 2009, pp. 35 y 36).

Las emisiones de GEI durante 2006 en México, por modo de transporte fueron:

innovación y el desarrollo de tecnologías bajas en carbono. Y el tercero plantea las acciones para remover las barreras a la eficiencia energética, así como informar, educar y persuadir a los individuos acerca de lo que pueden hacer para responder al cambio climático.+

³ PICC. 2007. Resumen para responsables de políticas. Cambio Climático 2007: Mitigación del Cambio Climático.

⁴ Proyecciones de la población de México 2005-2050. La población mexicana se encontraría ya en fase descendente en 2050.

⁵ Aquellos en los que se tendría que incurrir para atender los impactos económicos, sociales y ambientales resultado de la ausencia de políticas oportunas de mitigación y adaptación al cambio climático.

⁶ Lo cual implica un incremento de 2% respecto de los valores porcentuales reportados en 2002.

- Autotransporte 135.0 MtCO₂e (93.36%)
- Aéreo 5.4 MtCO₂e (3.73%)
- Ferroviario 1.8 MtCO₂e (1.24%)
- Marítimo 2.4 MtCO₂e (1.66%)
- Eléctrico No significativo

Los valores entre paréntesis representan el porcentaje respecto del total nacional generado por el sector transporte durante 2006. Las emisiones estimadas del sector transporte para los años 2020, 2030 y 2050, son de 186.5 MtCO₂e, 185.0 MtCO₂e y 128.0 MtCO₂e, respectivamente+(PEF, 2009, pp. 35 y 36).

Se debe remarcar la magnitud de las emisiones de GEI del modo aéreo, que es el segundo en importancia después del autotransporte, a pesar de que sólo contribuye con el 0.018% del movimiento de carga doméstica y 0.7% del movimiento doméstico de pasajeros (Martínez et al, 2012).

El Sistema Aeroportuario Nacional se compone de 60 aeropuertos que transportan a alrededor de 80 millones de pasajeros y 700 millones de toneladas de carga anualmente. De éstos, 17 concentran el 86% del tránsito de pasajeros y el 96% de la carga aeroportuaria (GR, 2013, p. 81).

La investigación en el área ambiental hace más eficiente la utilización de los recursos con objeto de confrontar el proceso de cambio climático; además, permite concentrar los esfuerzos en áreas que se han agrupado en tres ámbitos, la investigación en temas generales, la básica, y la sectorial. *“A través de dichos ámbitos, se buscará fortalecer las capacidades locales y nacionales y contar con acervos documentales para enfrentar el cambio climático”* Algunos de los objetivos prioritarios de investigación y desarrollo para la mitigación, la adaptación y la vulnerabilidad en México, en el tema de investigación básica son: Estimar factores nacionales de emisión para las principales fuentes emisoras de GEI (Objetivo 4.5.4); y evaluar el potencial de opciones tecnológicas de mitigación para los sectores emisores clave (Objetivo 4.5.10) (PEF, 2009, pp. 87 y 88).

El beneficio esperado de este trabajo es obtener elementos cualitativos, cuantitativos y metodológicos que puedan aplicarse para realizar un inventario de los gases contaminantes generados por la actividad aérea en México, así como el establecimiento de propuestas preliminares para internalizar los costos externos generados por dicha actividad y de esta forma contribuir a la atenuación del cambio climático con el consecuente beneficio para el desarrollo y bienestar humano.

1.2 Objetivos

Objetivo general:

Realizar una estimación preliminar de las emisiones contaminantes en el aire producidas por la actividad aérea en México, durante 2010.

Objetivos específicos:

- a) Identificar las principales metodologías desarrolladas para estimar las emisiones de gases contaminantes derivadas de la actividad aérea.
- b) Establecer una metodología para determinar las emisiones de gases contaminantes en México.
- c) Estimar los niveles de gases contaminantes con base en la metodología propuesta.
- d) Proponer algún mecanismo para recuperar parte de los costos externos asociados con la contaminación del aire derivada de la actividad aérea.

1.3 Alcances

Se propondrá una metodología para realizar un inventario de las emisiones de gases contaminantes generadas por la actividad aérea dentro, desde y hacia nuestro país, para el año 2010. En el caso de los vuelos internacionales se desglosarán las emisiones que correspondan al sobrevuelo del territorio nacional, sobre otros países y/o sobre aguas oceánicas. Además, se propondrá un mecanismo para internalizar los costos de las externalidades negativas derivadas de las emisiones contaminantes.

1.4 Metodología

La secuencia de pasos a seguir es la siguiente:

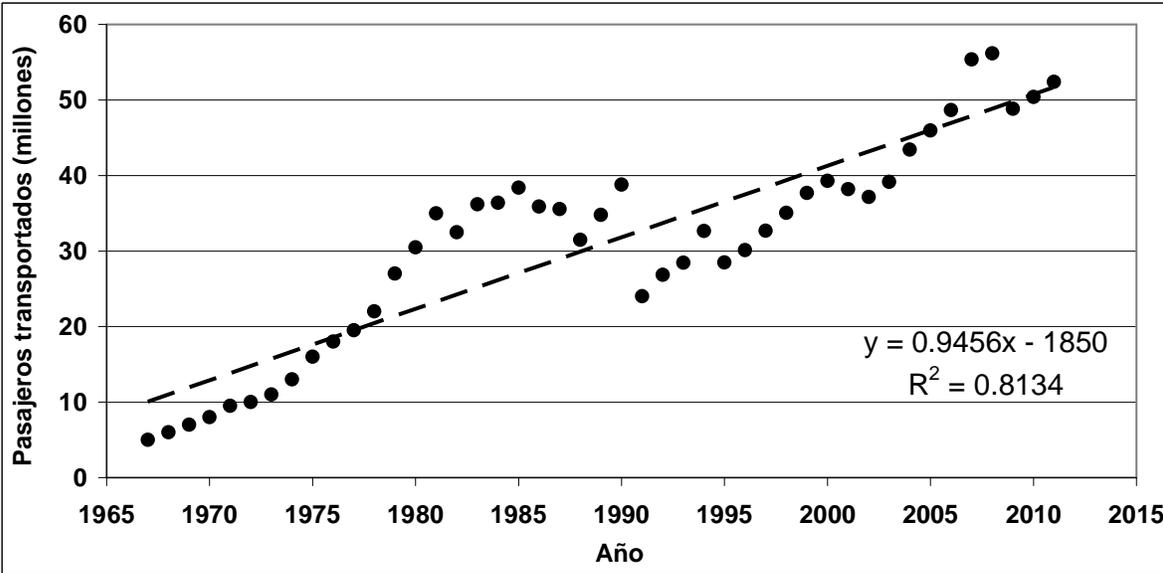
- a) Revisar las metodologías en el ámbito mundial, para la estimación de las emisiones de gases contaminantes generados por la actividad aérea.
- b) Con base en el análisis de la información recopilada, definir la metodología a seguir para realizar las estimaciones.
- c) Aplicar la metodología establecida y definir el mecanismo de internalización.
- d) Elaborar el reporte final.

2 Antecedentes

2.1 Generalidades

El transporte aéreo comercial en el ámbito mundial ha presentado recientemente crecimientos significativos, por ejemplo, durante los últimos 20 años, Norteamérica y Europa han presentado tasas de crecimiento medio anual (TCMA) del orden de 5.7% y 5% respectivamente. Por su parte, la región Asia-Pacífico ha presentado también un crecimiento importante durante este periodo (8.8%), por lo que presenta ahora una actividad similar a la de Europa. Un crecimiento todavía mucho mayor se ha observado en el Oriente Medio, con un crecimiento de 13% anual entre 2000 y 2007 (Sgouridis et al, 2011). En el caso de México, se ha presentado una TCMA, del número total de pasajeros transportados, durante los últimos 20 años del orden de 4.2% (DGAC, 2012).

La Figura 2.1 muestra el comportamiento del crecimiento de los pasajeros transportados en toda la red aeroportuaria nacional, tanto de flujos nacionales como internacionales, de vuelos regulares y de fletamento. Observe que la línea punteada representa la tendencia del comportamiento y que presenta un alto coeficiente de correlación.



Fuente: Elaboración propia con base en ASA, 1990 y DGAC, 2012.

Figura 2.1 Pasajeros transportados en el sistema aeroportuaria nacional 1967-2011

Desafortunadamente, la actividad aérea también contribuye a la generación de gases de efecto invernadero (GEI), por ejemplo, CO₂ y NO_x, por lo tanto, el

crecimiento de la actividad aérea irá acompañado de un incremento de estas emisiones, a menos de que se implementen medidas de mitigación.

En 2011 la actividad humana mundial generó 34,000 Mt de CO₂, de éstas, 669 Mt fueron originadas por la aviación comercial mundial, lo que representa alrededor del 2% del total mundial (<http://www.iata.org/policy/environment/climate/>).

Se supone que el potencial efecto negativo del incremento de las emisiones globales de CO₂ que genera la actividad aérea consolidará la presión pública y política para forzar a este sector a reducir las emisiones de estos gases. Dado que el transporte aéreo es un elemento vital para el desarrollo regional y la economía global al facilitar los flujos de pasajeros y mercancías, es necesario encontrar medios para transformar este servicio en una actividad sostenible. La sostenibilidad se debe entender en su sentido más amplio, como la capacidad de mantener un proceso desde tres perspectivas: (1) ambiental, (2) social y (3) económica. Con base en esta definición, un sistema de transporte aéreo sostenible, debe tener un impacto ambiental insignificante, pero debe satisfacer las necesidades de transporte de una sociedad globalmente conectada y ofreciendo adecuados rendimientos de inversión para atraer y retener a inversionistas y empleados, y apoyando la cadena de valor de bienes y servicios (Sgouridis et al, 2011).

2.2 Emisiones contaminantes en México

En 2005, entre los 192 países miembros de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), México se localizaba en la intersección de los conjuntos constituidos por los 25 países con mayor población, mayor PIB y mayores emisiones (considerando sólo las emisiones de CO₂ por quema de combustibles fósiles).

Entre los países con mayores emisiones, PIB per cápita y población, existen diferencias muy marcadas. En un extremo se encuentran países como Bangladesh, Nigeria y Pakistán, con una población muy grande, pero con niveles de emisiones y PIB per cápita muy bajos y, en el otro, países altamente industrializados, como Estados Unidos y Australia, con elevadas emisiones per cápita, o Noruega y Suiza también con altos valores de PIB, pero con emisiones per cápita significativamente menores (PEF, 2009, p. 4).

En el contexto mundial, México contribuye con alrededor del 1.6% a las emisiones de GEI, en 2006 éstas fueron de 715 MtCO₂e. En el rango de países emisores, se ubica en la posición número 13. Las emisiones per cápita de México en 2006, ascendieron a 6.2 tCO₂, y sin incluir la categoría de uso de suelo y cambio de uso de suelo y silvicultura, (USCUSS) fueron de 5.9 tCO₂.

La *intensidad de carbono* es la relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero y la magnitud de la economía que las genera, expresada como

producto interno bruto. En esta relación, México se sitúa cerca de países como Japón, con niveles bajos de intensidad de carbono. En México, tras un relativo estancamiento de la intensidad de carbono entre 1990 y 1996, parece haberse iniciado una fase de desacoplamiento en los años sucesivos. Continuar y profundizar este desacoplamiento entre el crecimiento y desarrollo económico y la intensidad de carbono en México, es el principal objetivo del PECC (PEF, 2009, pp. 5 y 6).

México ha abogado por un proceso flexible de convergencia de niveles de emisión per cápita, como principio rector de una evolución de largo plazo del régimen climático internacional. Este proceso implica que los mayores emisores per cápita, por lo general países desarrollados, reduzcan sus niveles de emisión, en tanto que los países menos desarrollados las incrementen por debajo de su escenario tendencial, al tiempo que prosiguen sus esfuerzos por alcanzar un desarrollo pleno y sustentable.

Se estima que la población mundial pasaría de 6,124 millones en el año 2000 a 9,191 millones en 2050, cuando casi todos los países habrán concluido su transición demográfica. Si se cumpliera la predicción demográfica y la hipótesis de limitación de las emisiones globales a mediados de siglo que refiere la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el promedio mundial de emisiones per cápita en el año 2050 sería de 2.785 tCO₂e/hab/año, cerca de 60% menos que a principios de siglo (PEF, 2009, p. 10).

Las emisiones per cápita de México se encuentran en la actualidad a un nivel bastante próximo al promedio mundial. Se espera que la población de México pase de 98.44 millones en el año 2000 a 121.86 millones en el año 2050. Si nuestro país asumiera como meta indicativa para el año de referencia un emparejamiento con el promedio mundial de emisiones per cápita antes indicado, las emisiones mexicanas de GEI no deberían sobrepasar entonces los 339.4 MtCO₂e. Para alcanzar este nivel de emisiones a mediados de siglo se necesitaría una reducción de 47.3% respecto a las emisiones del año 2000, que se han estimado en 643.6 MtCO₂e. En vista del amplio rango de incertidumbre asociado a las hipótesis manejadas, se considera válido redondear la cifra de reducción deseable a 50% para el 2050, respecto al 2000+.

La posición de México como país con desarrollo intermedio debe aprovecharse para adoptar opciones de desarrollo sustentable, con base en tecnologías limpias y bajas en carbono. Esta posición intermedia constituye una gran oportunidad para que México se mantenga indefinidamente en posiciones próximas a la trayectoria promedio global de emisiones per cápita, así como en línea con los requerimientos derivados de una meta global compartida.

En esta trayectoria deseable de reducción, las emisiones mexicanas tendrían que alcanzar un punto de inflexión durante la segunda década de este siglo, para después descender paulatinamente hasta alcanzar el nivel indicado en 2050. Es

muy probable que esta trayectoria dibuje una curva irregular en el tiempo, con altibajos y tramos sin reducciones patentes, en función de la dinámica económica y la entrada en vigor de las sucesivas y cada vez más complejas y costosas medidas de mitigación.

Para cumplir con la meta indicativa señalada, el país necesitará complementar sus esfuerzos con recursos tecnológicos y financieros que tendría que facilitar el nuevo régimen de colaboración internacional en la materia. Asumir la responsabilidad y desarrollar el mejor esfuerzo nacional será condición indispensable para exigir reciprocidad a otros países (PEF, 2009, p. 11).

El escenario de mitigación del Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 prevé que la reducción de emisiones, durante el periodo comprendido entre 2008 y 2012, marcará el inicio del proceso nacional de descarbonización y de una trayectoria que se separe de la línea base a partir de 2008, o modifique el escenario tendencial sin comprometer las perspectivas nacionales de desarrollo. La distribución de las cargas de reducción entre los diferentes sectores para los años 2020, 2030 y 2050 será desigual y dependerá de sus actuales indicadores de intensidad de carbono (PEF, 2009, p. 16).

2.3 Adaptación en el largo plazo para minimizar las consecuencias adversas del cambio climático

México otorga la misma importancia a las tareas de adaptación al cambio climático que a las de mitigación de emisiones de GEI. La adaptación plantea un profundo reto a las políticas públicas, ya que reducir la vulnerabilidad de las personas y de sus bienes, de las infraestructuras y de los ecosistemas, supone aprender a actuar en función del largo plazo, y trascender la temporalidad habitual de políticas y programas. Se requiere revisar y fortalecer el sistema de planeación para adecuarlo a horizontes temporales más allá de pocas décadas, de tal modo que no se limite a medidas reactivas de corto plazo, sino que sea capaz de orientar la evolución espacial de la economía, de los asentamientos humanos y de las demás infraestructuras.

El proceso de adaptación también debe considerar las oportunidades que pudieran surgir por las nuevas condiciones climáticas, particularmente por la introducción de tecnologías limpias y las oportunidades de negocios.

La visión de largo plazo para la adaptación confía en minimizar los costos de las consecuencias adversas previsibles del calentamiento global, reducir la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales, e identificar oportunidades que puedan traducirse en beneficios. La adaptación es una inversión que fortalece el presente y asegura el futuro ante condiciones climáticas inéditas.

Globalmente, el desarrollo de capacidades de adaptación se considera un proceso gradual que incluye la mitigación para evitar que se magnifique la intensidad de los impactos adversos.

Durante la última década, los efectos del cambio climático y la degradación ambiental se han intensificado. Las sequías, inundaciones y ciclones entre 2000 y 2010 han ocasionado alrededor de 5,000 muertes, 13 millones de afectados y pérdidas económicas por 250,000 millones de pesos (GR, 2013, p. 77).

El cambio climático intensificará los fenómenos hidrometeorológicos extremos y, consecuentemente, se incrementarán los costos de sus impactos. Iniciar cuanto antes un proceso apropiado de adaptación resulta una buena inversión, porque permitiría reducir los costos futuros por impactos adversos hasta en 60% (PEF, 2009, p. 22). Además, se ha estimado que los impactos del calentamiento global en la infraestructura de transporte terrestre, marítimo y aéreo podrían ser significativos (PEF, 2009, p. 66).

2.4 Calculadora de emisiones de carbono de la Organización de la Aviación Civil Internacional

La Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) desarrolló una metodología para estimar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que se generan por la actividad aérea. Mediante la calculadora de la OACI los pasajeros pueden estimar las emisiones que se generan como consecuencia de sus viajes aéreos. Su utilización es simple y requiere muy poca información.

Esta metodología utiliza información pública disponible de la industria aérea para sus estimaciones. Por ejemplo, tipos de aeronaves y factores de ocupación e información de las rutas aéreas.

Para realizar las estimaciones se requiere indicar los aeropuertos de origen y destino, el tipo de boleto adquirido (clase económica, o premier), el número de pasajeros, y si se trata de un viaje sencillo o redondo. Como resultado la calculadora estima la magnitud de la huella ambiental en kilogramos de CO₂ (<http://www2.icao.int/en/carbonoffset/Pages/default.aspx>).

En la Figura 2.2 se han capturado los datos para determinar la magnitud del impacto ambiental de un vuelo entre el la Ciudad de México y Tijuana, se consideró un viaje redondo de clase económica para un pasajero.

El resultado obtenido por la calculadora también se muestra en la figura, en este caso se estimó un impacto ambiental de 386.35 kilogramos de CO₂. Observe que, además, la calculadora estima una distancia del recorrido, en este caso de 4,600 kilómetros (que corresponde al viaje redondo).

You can find your carbon footprint by entering your city of origin and destination

From: MEXICO CITY, MEX (MEX) To: TIJUANA, MEX (TIJ)

My ticket is: Economy Class Premium Class (Economy Premium, Business, or First)

Number of passengers: 1 One-Way Round Trip

Restart Calculate Add a Flight

Here is your footprint

1 passenger, flying round trip from MEXICO CITY, MEX (MEX) to TIJUANA, MEX (TIJ) (4,600 Km), in Economy Class, generates about **386.35 Kg** of CO₂

More Details

New Calculation

[Help us improve the calculator](#)

Fuente: <http://www2.icao.int/en/carbonoffset/Pages/default.aspx>

Figura 2.2 Ejemplo de la estimación del impacto ambiental utilizando la calculadora de la OACI

La metodología utilizada por la OACI tiene un enfoque que se fundamenta en la distancia recorrida por las aeronaves, además, utiliza información disponible en forma pública de los diferentes tipos de aeronaves que operan actualmente. Para implementar esta metodología la OACI utilizó las mejores bases de datos disponibles de los consumos de combustible de las aeronaves y continuamente actualiza y mejora dicha información, con objeto de obtener estimaciones precisas de los gases contaminantes.

Esta metodología fue diseñada para requerir una cantidad mínima de información de entrada de cada vuelo de interés y utiliza factores promedio de los diversos factores que se requieren. Dado que las emisiones generadas son afectadas por los continuos cambios en las variables específicas de cada vuelo, fue necesario desarrollar factores promedio para estimar los efectos de estos parámetros de vuelo

La calculadora de emisiones de carbono de la OACI requiere como datos de entrada, los aeropuertos de origen y destino. Esta información es comparada con los vuelos regulares establecidos por las aerolíneas, para determinar el tipo de aeronave que es utilizado para dar servicio en los aeropuertos de interés. Posteriormente, se determina la correspondencia de cada aeronave con uno de los cincuenta tipos equivalentes considerados por la calculadora, para estimar el consumo de combustible del viaje con base en la distancia del círculo máximo (distancia ortodrómica) entre los aeropuertos involucrados en el vuelo. Después, los factores de utilización de las aeronaves y de la carga por pasajero, obtenidos de información operacional recopilada por la OACI, son aplicados para obtener la proporción del total de combustible utilizado y que puede ser atribuido al traslado del pasajero. Enseguida el sistema estima el consumo de combustible promedio para el viaje, ponderado por la frecuencia de salidas de cada tipo de aeronave equivalente. Este valor se divide entonces entre el número total de pasajeros de clase económica equivalente, lo que da como resultado el consumo de combustible promedio por pasajero de clase económica. Finalmente, el resultado anterior se multiplica por un factor de generación de emisiones (3.157), para determinar la cantidad de huella de CO₂ atribuido a cada pasajero que viaja entre el par de aeropuertos considerados.

La metodología utilizada por la OACI en el desarrollo de la calculadora de emisiones utiliza una base de datos proveniente de diversas fuentes. A continuación se mencionan algunas de las características de las principales (<http://www2.icao.int/en/carbonoffset/Pages/default.aspx>).

Pares de ciudades. Se obtienen de las bases de datos de las aerolíneas regulares. La información de los vuelos regulares se actualiza con una frecuencia anual.

Distancia del círculo mayor. Es la distancia entre los aeropuertos de origen y destino. Se estima con base en las coordenadas de latitud y longitud de las bases de datos de los indicadores de localización de los aeropuertos que maneja la OACI.

Factor de utilización de las aeronaves. Son los factores promedio que provienen de las bases de datos que obtienen las aerolíneas por cada par de ciudades y por tipo de aeronave, se generan con una frecuencia anual. También incluye información generada por la propia OACI.

Consumo de combustible/kilómetro. Esta información, para los distintos modelos de aeronaves equivalentes, se obtiene de la base de datos de CORINAIR⁷ y, además, es ampliada por la OACI, para reflejar el consumo de combustible de las aeronaves de turboreactor en servicio regional.

Número de asientos. Éste es el número de asientos de clase económica que pueden ajustarse en el interior de una aeronave equivalente. La OACI consideró un arreglo de cabina estándar, en términos de ubicación de cocinas, baños y salidas, para cada aeronave de referencia. Bajo este arreglo se estableció un acomodo general de asientos de clase económica con una separación de aproximadamente 80 centímetros. Después, esta configuración se comparó con otras configuraciones mixtas que consideraban combinaciones con las clases de negocios y de primera. Para las aeronaves de cabina ancha se consideraron separaciones de 97 centímetros para la clase de negocios y de 152 centímetros para la primera clase. Los ejemplos de estos arreglos se obtuvieron de los manuales de las características de las aeronaves publicados en Internet por los fabricantes de aeronaves.

2.4.1 Metodología utilizada por la calculadora de la OACI

En términos generales, esta metodología sigue estos pasos:

Datos de ingreso del usuario. El usuario registra los aeropuertos de origen y destino. En este punto el sistema realiza una búsqueda en la base de datos de todos los vuelos, tanto directos como no directos, que ofrecen servicio a los aeropuertos registrados. Sin embargo, la herramienta no estima el total de emisiones para aquellos viajes con diferentes vuelos (vuelos de conexión). Para hacer esto, el usuario debe estimar cada tramo de su viaje en forma independiente y después sumar cada valor obtenido.

Los vuelos de código compartido son manejados como un solo vuelo. De esta forma se evita la posibilidad de duplicar los registros de las salidas, para no afectar las estimaciones.

La base de datos de los orígenes y destinos incluye rutas individuales para el mismo número de vuelo cuando hay escalas intermedias, las cuales no son visualizadas por el usuario.

⁷ CORINAIR es un programa para establecer un inventario de emisiones de gases contaminantes en Europa. Inició con el grupo de trabajo de la Agencia Europea del Ambiente (European Environment Agency) y formó parte de los trabajos de la Coordinación de Información Ambiental (Corine), establecida en 1985 por el Consejo Europeo de Ministros. Posteriormente, en 1995, el Centro de Asuntos Europeos de Emisiones del Aire (European Topic Centre on Air Emissions, ETC/AEM) fue contratado para continuar con el programa de CORINAIR (<http://glossary.eea.europa.eu/terminology/sitesearch?term=CORINAIR>).

Distancia de viaje. Las bases de datos de los indicadores de ubicación de la OACI, registran las coordenadas de longitud y latitud de cada aeropuerto. Con base en estas coordenadas se estima la distancia del círculo mayor⁸ entre los dos aeropuertos seleccionados.

Estadísticas del tránsito. Un factor de ocupación de pasajeros por aeronave se asigna a cada usuario, con base en el grupo de ruta que le corresponda. La calculadora obtiene esta información de una base de datos que agrupa a 17 rutas internacionales y cinco áreas domésticas.

Asignación del tipo de aeronave. De la base de datos de los vuelos regulares, se identifica y relaciona la aeronave correspondiente con las estadísticas de consumo de combustible de CORINAIR. Cuando la aeronave no se encuentre directamente en la base de datos, se le asigna uno de los cincuenta tipos de aeronave equivalente, en función de su consumo de combustible. Con base en esta asignación se estima el consumo de combustible de la ruta definida por el par de aeropuertos que seleccionó el usuario.

Información del combustible consumido. La relación combustible consumido/distancia de vuelo, se estima al extrapolar la información de la Guía del Inventario de Emisiones (Emissions Inventory Guidebook, EIG) que prepara CORINAIR⁹. Las variables que se consideran son el factor de ocupación de pasajeros, la distancia de vuelo, la proporción total de carga representada por los pasajeros, el tipo de boleto adquirido (clase económica o premier) y el tipo de aeronave. La cantidad de combustible consumida en la ruta seleccionada se obtiene al ponderar el combustible total quemado con las frecuencias del tipo de aeronave correspondiente.

Número de asientos de clase económica y capacidad de asientos. Con base en los distintos arreglos de cabina obtenidos del Manual de Características de las Aeronaves para la Planeación Aeroportuaria¹⁰, se determina el número máximo de asientos de clase económica que pueden acomodarse en una aeronave determinada. Esta configuración virtual de clase económica se utiliza posteriormente para estimar los factores de configuración de cabina.

Emisiones de CO₂ por pasajero de clase económica. Utilizando la distancia de viaje, el consumo de combustible por aeronave equivalente, el factor de ocupación por aeronave, el factor de carga por pasajero y el número de asientos

⁸ Es la distancia más corta entre dos puntos ubicados sobre la superficie de una esfera.

⁹ <http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR4/en/page002.html>

¹⁰ Esos manuales, que son desarrollados por los fabricantes de las aeronaves, proveen información necesaria para los operadores aeroportuarios y las aerolíneas, como soporte para la planeación de las instalaciones en el aeropuerto.

de clase económica se estiman las emisiones de CO₂ asociadas con cada pasajero. Para esto se utiliza la siguiente fórmula:

$$CO_2 \text{ por pasajero} = 3.157 \times (ctu \times \text{relación } p/c) / (n \times fu) \quad (2.1)$$

En donde:

ctu, es el combustible total utilizado. Es el combustible ponderado que se utiliza por todos los vuelos que salen del aeropuerto de origen seleccionado para llegar al aeropuerto de destino. El factor de ponderación es la relación entre el número de salidas para cada tipo de aeronave equivalente y el número total de salidas.

Relación p/c, es la relación pasajero/carga. Es un factor estimado por la OACI con base en información estadística del número de pasajeros y la cantidad de toneladas de carga y correo transportados en una ruta dada.

n, es el número total de asientos equivalentes disponibles de clase económica, en los vuelos que sirven un par específico de aeropuertos.

fu, es el factor de utilización de la aeronave. Es la relación estimada por la OACI con base en información estadística del número de pasajeros transportados y el número de asientos disponibles en una ruta específica.

3.157, es una constante que representa el número de toneladas de CO₂ generadas al quemar una tonelada de turbosina.

Cabe señalar que dependiendo de la selección del usuario, se aplica un factor multiplicativo de acuerdo con la clase de cabina, para ajustar las emisiones de CO₂ por pasajero de clase económica, en aquellas rutas donde son disponibles servicios de distintas clases.

2.4.2 Sensibilidad de la calculadora de la OACI

En cualquier tipo de modelación siempre se desea precisión, sin embargo, esta depende del nivel de complejidad establecido. En el caso de la metodología seguida por la OACI, intentaron considerar los principales factores que definen la huella de carbono en el transporte aéreo, sin embargo, ellos mismos reconocen la incertidumbre inherente en cada uno de los supuestos de su enfoque, por ejemplo:

Distancia del círculo mayor. Aunque se sabe que el viaje no ocurre en línea recta entre los dos aeropuertos, las estadísticas reales recopiladas por las aerolíneas o de otras bases de datos más precisas de estas distancias no son actualmente disponibles.

Representatividad de las aeronaves. Aunque las aeronaves que ofrecen servicios similares comparten características de rendimiento análogas, la adopción de un enfoque que considera a una aeronave representativa es necesaria y razonable, dado el nivel de detalle de la información disponible. Sin embargo, se sabe que las estadísticas de CORINAIR no tienen representación para algunos tipos de aeronaves. También, se advierte que existen considerables diferencias en el consumo de combustible de aeronaves del mismo tipo, debido a muchos factores, como, por ejemplo, su edad, configuración y tipo de motores utilizados. No obstante, en la actualidad no es posible identificar una fuente adecuada de base de datos de acceso público alternativa a la de CORINAIR.

Factor de tipo de cabina. Se reconoce que existen diversas configuraciones de arreglos de asientos y diversas clases de servicio entre las diferentes aerolíneas. Sin embargo, la calculadora de la OACI no utiliza una configuración específica de aeronave, en su lugar considera un enfoque de arreglo equivalente, el cual busca representar al conjunto de los equipos utilizados actualmente. Debido a la naturaleza genérica de esta metodología, se decidió utilizar un enfoque simplificado, restringiendo las clases de cabina a sólo dos: una que representa la clase económica y otra a la clase premier (para las clases premium, de negocios y de primera).

Factor de carga del pasajero. Los factores promedio de carga por pasajero se estimaron con base en los agrupamientos de las rutas para los vuelos internacionales, y en agrupamientos regionales para los vuelos domésticos. La información se obtiene de las estadísticas que reportan los diferentes países a la OACI. Esta información se actualiza con una frecuencia anual.

Factor pasajero/carga. El factor promedio pasajero/carga se estima con base en los agrupamientos de las rutas para los vuelos internacionales y en agrupamientos regionales para los vuelos domésticos. La información se obtiene de las estadísticas que reportan los diferentes países a la OACI. Esta información también se actualiza con una frecuencia anual.

Consumo de combustible por tipo de aeronave. Aunque la mayoría de las aerolíneas tienen información detallada en relación con el consumo de combustible y de su eficiencia, esta información no está disponible en forma pública. Dado que no fue posible identificar una fuente alterna de información pública confiable, por ahora, para el propósito de la metodología utilizada, la mejor información proviene de CORINAIR (ICAO, 2010).

Aunque la calculadora de la OACI tiene muchas ventajas, se deben señalar algunos inconvenientes detectados, por ejemplo, no estima la contaminación generada para un vuelo completo, sólo en forma individual por pasajero. Además, no considera en sus bases de datos algunos aeropuertos mexicanos que tuvieron actividad aérea durante 2010, año para el cual se realizaron las estimaciones de emisiones en esta investigación. Debido a su estructura, tampoco desglosa, en el

caso de los vuelos internacionales, las emisiones que corresponden al trayecto sobre México, sobre otro país o sobre aguas oceánicas.

3 Características operativas

3.1 Fuente de información

La información estadística de las operaciones aéreas realizadas durante 2010 se obtuvo de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), en el portal <http://www.sct.gob.mx/> de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Con base en estas bases de datos se determinaron las operaciones de servicio regular y de fletamento, tanto nacional como internacional.

3.2 Compañías aéreas que operaron en México en 2010

Las aerolíneas nacionales que operaron en 2010 en México se muestran en la Tabla 3.1, también se indica el tipo y cantidad de aeronaves que fueron utilizadas para ofrecer su servicio.

Del total de aeronaves correspondientes a las aerolíneas mexicanas, aproximadamente el 44.1% correspondió a la operación troncal, el 39.3% a la aviación regional, el 13.9% a las operaciones exclusivas de carga y 2.6% fueron operaciones de fletamento.

Se detectaron 25 modelos de aeronaves, pero 8 de éstos concentraron al 80% de los equipos que dieron servicio, los cuales son: Boeing 737, Airbus A320, Embraer 145EP, Airbus A319, Boeing 717, Fokker, CRJ 600-2B19 y ATR-42.

Además de estas compañías aéreas nacionales, en México operaron las 62 aerolíneas extranjeras que se señalan en la Tabla 3.2.

La mitad de estas aerolíneas son de Norteamérica, 29% de Europa, 11.3% de Centroamérica y el Caribe, 8% de Sudamérica y 1.6% de Asia.

De todas estas compañías extranjeras que operaron durante 2010 en México, se obtuvo información adicional del portal en Internet de la DGAC, en su apartado de operaciones mensuales por empresa, y también de los portales de cada una de estas aerolíneas.

En general se observó que los aviones más utilizados por estas compañías fueron los Airbus A319 y A320; y los Boeing B737 y B777; y en los vuelos con mayor radio de acción los B747, que fueron las aeronaves más grandes que arribaron a un aeropuerto mexicano en 2010.

Tabla 3.1 Compañías aéreas nacionales que operaron en México en 2010 y tipos de aeronaves utilizadas

Línea aérea	Tipo de aeronave ¹	Cantidad
Troncales		
136		
ABC AEROLÍNEAS (INTERJET)	AIRBUS A-320	22
AEROLÍNEAS NACIONALES (VIVA AEROBUS)		11
	BOEING 737-301	4
	BOEING 737-387	5
	BOEING 737-3Y0	1
	BOEING 737-3L9	1
AEROVIAS DE MÉXICO (AEROMÉXICO)		49
	BOEING 737-700	28
	BOEING 737-800	10
	BOEING 767-200	4
	BOEING 767-300	2
	BOEING 777-200	4
	MD-83	1
MEXICANA DE AVIACIÓN ²		28
	AIRBUS A318	1
	AIRBUS A319-100	7
	AIRBUS A320	18
	AIRBUS A330	2
VUELA (VOLARIS)		26
	AIRBUS 319-132/133	22
	AIRBUS 319-100	2
	AIRBUS 320-200	2
Regionales		
121		
AEROLITORAL (AEROMÉXICO CONNECT)		46
	EMBRAER 145EP	5
	EMBRAER 145LR	29
	EMBRAER 145MP	5
	ERJ 190-100LR	7
AEROMAR		14
	ATR-42	14
AEROVIAS CARIBE (CLICK) ²		35
	FOKKER	16
	BOEING 717-200	19
GRUPO AEREO MONTERREY (MAGNICHARTERS)		11
	BOEING 737-200	4
	BOEING 737-300	1
	BOEING 737-322	5
	BOEING 737-301	1
MEXICANA LINK ²		15
	CRJ 600-2B19	15
De fletamento		
8		
AEROLÍNEAS DAMOJH (GLOBAL AIR)		5
	BOEING 737-2H4	5
AEROMÉXICO TRAVEL		3
	MD 83	3
Exclusivas de carga		
43		
AEROLÍNEAS REGIONALES		1
	B737-200F	1
AERONAVES TSM		18
	CV600-240D	3
	FAIRCHILD SA 226-AT	1
	FAIRCHILD SA 226-TC	5
	FAIRCHILD SA 227-AC	8
	LEAR JET LJ24	1
AERO UNION		4
	AIRBUS 300 B4	4
AEROSERVICIOS DE LA COSTA		3
	SA-227-AC	3
AEROTRANSPORTES MAS DE CARGA (MAS AIR)		2
	BOEING 767-300F	2
ALCON SERVICIOS AEREOS		2
	NIHON YS-11A	2
ESTAFETA CARGA AEREA		7
	BOEING 737-229	1
	BOEING 737-375	1
	BOEING 737-3M0	2
	BOEING 737-3Y0	1
	BOMBARDIER CL-600	2
VIGO JET		6
	FAIRCHIL-227-AC	2
	SABRELINER NA-265-40	2
	SABRELINER NA-265-60	1
	FAIRCHIL 340A	1
TOTAL		308

Notas:

¹El equipo de vuelo de las líneas aéreas nacionales considera el número de aeronaves activas sólo de las aerolíneas mexicanas incluyendo matriculas nacionales y extranjeras (no incluye taxis aéreos).

²Suspendió operaciones en agosto de 2010.

Fuente: Elaboración propia con base en DGAC, 2011.

Tabla 3.2 Empresas regulares extranjeras con operaciones hacia y/o desde el territorio nacional durante 2010

Región	Línea aérea	Cantidad
Norteamérica*	ABX Air inc Air Canada Airtran Airways Air Transat Alaska American Airlines American Eagle Amerijet Internacional Astar Air Cargo Brenda Usa 3000 Centurion Comair Compass Airlines Continental Delta Express Jet Federal Express Frontier Airlines Horizont Air Jet Blue Mesa Airlines Mn Airlines Llc Northwest Skywest Spirit Airlines Sunwing United Airlines United Parcel Service Us Air Virgin America, Inc West Jet	31
Centroamérica y el Caribe	Aviateca Cia. Panameña de Aviación Cubana de Aviación Dhl Guatemala Lacsa Maya Airways Taca	7
Sudamérica	Avianca Lan Chile Lan Perú Taca Peru Tampa	5
Europa	Air Berlin Air España Air France Blue Panorama British Airways Cargolux Airlines Corse Air Edelweiss Iberia Iberworld Klm Livingston Spa Lufthansa Martin Air Holland Neos air (Neos S.P.A.) Tui Belgium Tui Nederland XL Airways	18
Asia	Japan Airlines	1
	Total	62

Nota: *¹Incluye empresas de Estados Unidos y Canadá.

Fuente: Elaboración propia con base en DGAC, 2011.

3.3 Combustibles de aviación

En particular, en México sólo se utilizan dos combustibles de aviación, la turbosina y el gas avión.

3.3.1 Turbosina

Es una mezcla de hidrocarburos parafínicos y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Se utiliza como combustible en motores de aviación a turbina (<http://www.asa.gob.mx/es/ASA/Productos>).

Este tipo de combustible tiene como característica que su peso específico a 20°C oscila entre los 0.772 a 0.837 kg/l y su temperatura de inflamación es de 38°C mínimo y la de congelación -47°C máximo (NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005¹¹).

La turbosina es muy similar al keroseno (destilado número 2 del petróleo) y puede ser adecuadamente representada por el n-decano (C₁₀H₂₂). Éste es un alcano alifático (hidrocarburo saturado), por lo que, sólo está formado por átomos de carbono e hidrógeno. La formula general de los alcanos alifáticos es C_nH_{2n+2}.

La relación estequiométrica de la combustión del n-alcano es la siguiente:



Éste es el caso ideal, en la realidad el proceso no es tan simple y se generan otros subproductos (Flack, 2005). La siguiente tabla lista los principales componentes que se presentan en el escape de un motor turborreactor en operación, también se señalan las distintas fuentes de estas sustancias.

Generalmente los tres principales contaminantes evaluados son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrocarburos no quemados (HCNQ). En 1981 la OACI fue una de las primeras en adoptar estándares relacionados con el control de las emisiones contaminantes de CO, NO_x, y HCNQ que son generados por los motores tipo turborreactor y turbohélice de las aeronaves. Sin embargo, existen otras sustancias contaminantes como el humo, cuyos efectos en la salud humana y en el cambio climático sólo recientemente han empezado a ser comprendidos y para los cuales hay pocos estándares. Cabe señalar que históricamente, el dióxido de carbono (CO₂) y el vapor de agua habían sido considerados como subproductos inofensivos de la combustión y sólo en años recientes han sido considerados como productos contaminantes (Sweriduk, et al., 2011).

¹¹ Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 30 de enero de 2006.

Tabla 3.3 Productos generados en el escape de un motor turborreactor en operación

Componentes principales	Concentración típica (% del volumen)	Fuente
Nitrógeno (N ₂)	66-72	Aire de entrada al motor
Oxígeno (O ₂)	12. 18	Aire de entrada al motor
Dióxido de carbono (CO ₂)	1-5	Oxidación del carbón del combustible
Vapor de agua (H ₂ O)	1-5	Oxidación del hidrógeno del combustible
Componentes contaminantes secundarios	Concentración típica (partes por millón en volumen)	Fuente
Óxido nítrico (NO)	20-220	Oxidación del nitrógeno atmosférico
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	2-20	Oxidación del nitrógeno orgánico contenido en el combustible
Monóxido de carbono (CO)	5-330	Oxidación incompleta del carbono del combustible
Dióxido de azufre (SO ₂)	Rastros. 100	Oxidación del azufre orgánico contenido en el combustible
Trióxido de azufre (SO ₃)	Rastros-4	Oxidación del azufre orgánico contenido en el combustible
Hidrocarburos no quemados	5-300	Oxidación incompleta del combustible
Humo	Rastros-25	Ingestión en la admisión de objetos extraños, cenizas en el combustible y/o oxidación incompleta del combustible

Fuente: Pavri y Moore, 2001.

3.3.2 Gas avión

Es un líquido de alto octanaje obtenido a partir de la desintegración catalítica de los gasóleos pesados, que a su vez son un destilado intermedio del crudo. Se emplea como combustible en aviones de pistón (<http://www.asa.gob.mx/es/ASA/Productos>).

3.3.3 Relación de la cantidad de emisiones de gases contaminante por litro de combustible

Con base en una solicitud de información a Petróleos Mexicanos (PEMEX) se obtuvo la relación de gases contaminantes que se generan por cada litro de combustible quemado, tanto de gas avión como de turbosina (Anexo 1). En particular, los gases contaminantes señalados fueron el dióxido de carbono (CO₂), el óxido de azufre (SO_x) y el óxido de nitrógeno (NO_x).

Tabla 3.4 Cantidad de gases contaminantes generados por la combustión de un litro de gas avión o de turbosina

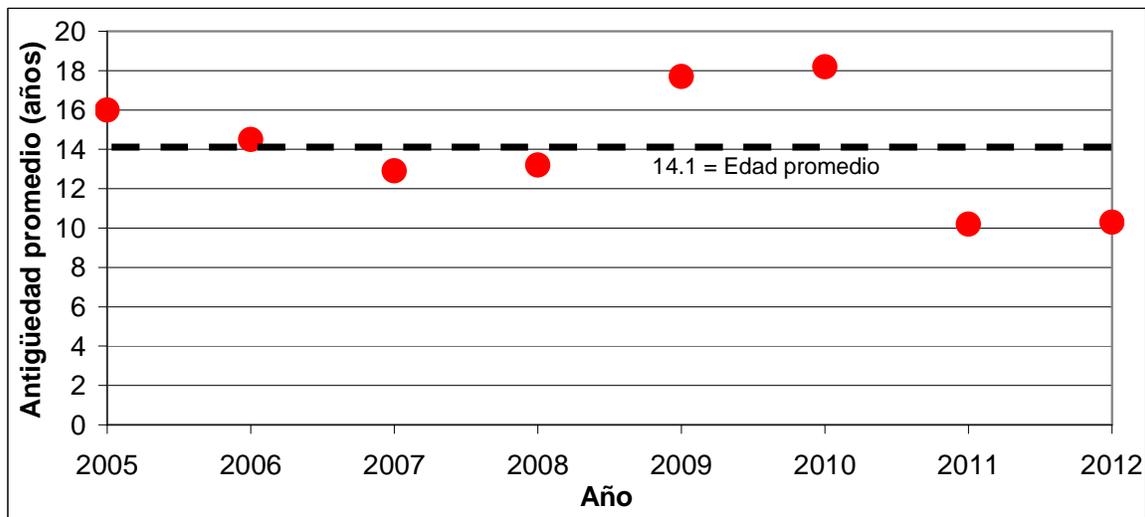
Combustible	Dióxido de carbono (CO ₂) (kg)	Óxido de azufre (SO _x) (kg)	Óxido de nitrógeno (NO _x) (kg)
Gas avión	2.536	0.0014	0.0268
Turbosina	2.036	0.0011	0.0215

Fuente: Subdirección de Disciplina Operativa, Seguridad, Salud y Protección Ambiental de Petróleos Mexicanos, ver Anexo 1.

Cabe señalar que las cifras señaladas en la tabla pueden variar dependiendo de la eficiencia de la máquina empleada, así como de los cambios en las condiciones de operación, por ejemplo, temperatura ambiente, presión atmosférica y humedad. Con base en esta información y con el consumo de combustible de las aeronaves se puede estimar la cantidad de gases contaminantes generados.

3.4 Antigüedad de las aeronaves

De acuerdo con los registros de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), en relación con la antigüedad de la flota aérea que ofreció servicio aéreo regular nacional durante el periodo 2005-2012, se observó para dicho intervalo una edad promedio de 14.1 años. Aunque se observan fluctuaciones en la antigüedad promedio para cada año señalado, también se observa una disminución significativa en la edad de las aeronaves durante el periodo 2011-2012, con un valor promedio en este caso de aproximadamente 10.3 años. Esto se debe a que recientemente varias aerolíneas mexicanas han renovado su flota con aeronaves de modelos más recientes.



Fuente: Elaboración propia con base en: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC/>.

Figura 3.1 Antigüedad de la flota aérea en servicio regular nacional, 2005-2012

4 Metodologías para estimar las emisiones

En este capítulo se presentan y aplican dos metodologías para estimar las emisiones contaminantes generadas por la actividad aérea de México. En la primera alternativa se realiza la estimación en función del consumo de los combustibles fósiles que utilizan tanto las aeronaves de motor de pistón (gas avión), como las de turbina (turbosina). Esta primera estimación, considera los volúmenes de gases contaminantes generados por unidad de combustible quemada. En la segunda alternativa con base en los vuelos registrados y el tipo de aeronave que realizó cada vuelo, se estimaron los consumos de combustible y posteriormente las emisiones contaminantes. En este caso se puede estimar adicionalmente, sobre qué superficie se produjeron las emisiones, es decir sobre territorio nacional, aguas oceánicas o sobre territorio extranjero.

4.1 Primera estimación, con base en el consumo de combustible

En esta primera estimación para determinar las emisiones contaminantes de las aeronaves se utilizó la información reportada por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), en relación con el consumo de combustible de aviación durante 2010, tanto de turbosina como de gas avión (Tabla 4.1). Posteriormente, con información proporcionada por Petróleos Mexicanos (Tabla 3.4), en cuanto a la cantidad estimada de gases de efecto invernadero emitidos por la combustión de un litro de combustible de aviación, se estimaron las emisiones totales anuales que genera la actividad aérea de nuestro país.

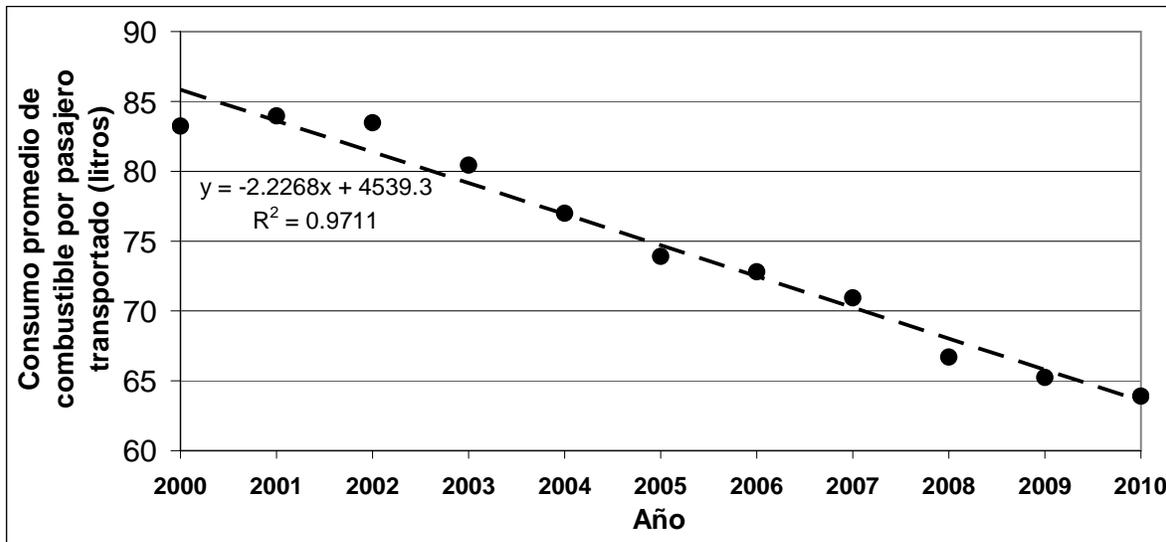
Tabla 4.1 Consumo anual de combustible que ASA proporcionó a los aeropuertos durante el periodo 2000-2010

Año	Consumo de combustible (litros)	
	Turbosina	Gas avión
2000	3,270,035,473	24,702,920
2001	3,205,912,132	23,831,943
2002	3,099,860,051	23,726,681
2003	3,148,857,396	24,719,648
2004	3,342,126,082	26,187,412
2005	3,395,615,889	26,683,537
2006	3,542,616,248	27,231,554
2007	3,926,844,596	29,001,825
2008	3,746,383,239	28,249,636
2009	3,186,066,245	27,494,504
2010	3,220,411,702	28,666,116

Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por ASA Combustibles y la Unidad de Enlace para la Transparencia de ASA.

De acuerdo con el consumo de combustible anual reportado por ASA, se observa que en general la turbosina representa el combustible con mayor demanda, mientras que su consumo se mide en miles de millones de litros, el de gas avión es apenas en millones de litros. Durante el periodo señalado en la tabla, en promedio el consumo de gas avión respecto del total de combustible de aviación suministrado, representó menos de un 1% (exactamente 0.78%). En otras palabras, por cada 100 litros de combustible suministrado por ASA, menos de un litro corresponde al gas avión.

Con base en los consumos de combustible anuales (Tabla 4.1) y los pasajeros totales transportados durante dichos años, es posible estimar el consumo promedio de combustible por pasajero durante dicho periodo (Figura 4.1).



Fuente: El consumo anual de turbosina se obtuvo de la Tabla 4.1. El número de pasajeros anuales transportados se obtuvo de la DGAC (2011, Capítulo 1).

Figura 4.1 Consumo promedio de combustible por pasajero

Se observa que a partir de 2001 ha disminuido en forma sostenida el consumo de combustible por pasajero transportado, es decir ha habido un incremento del rendimiento operacional de las aerolíneas, lo cual está asociado con la incorporación de flota aérea más moderna. Sin embargo, se debe señalar que esta mejora refleja el desempeño promedio de las aerolíneas nacionales y extranjeras que operan en nuestro país, en vuelos nacionales e internacionales; y también, que sólo se consideró el consumo de turbosina, el cual representa, como se señaló antes, el combustible más utilizado por la aviación que opera en México. Durante el periodo 2000-2010 la turbosina representó más del 99% del consumo total de combustible vendido por ASA. La Figura 4.1, también muestra la

línea de tendencia de este comportamiento la cual presenta un alto coeficiente de correlación.

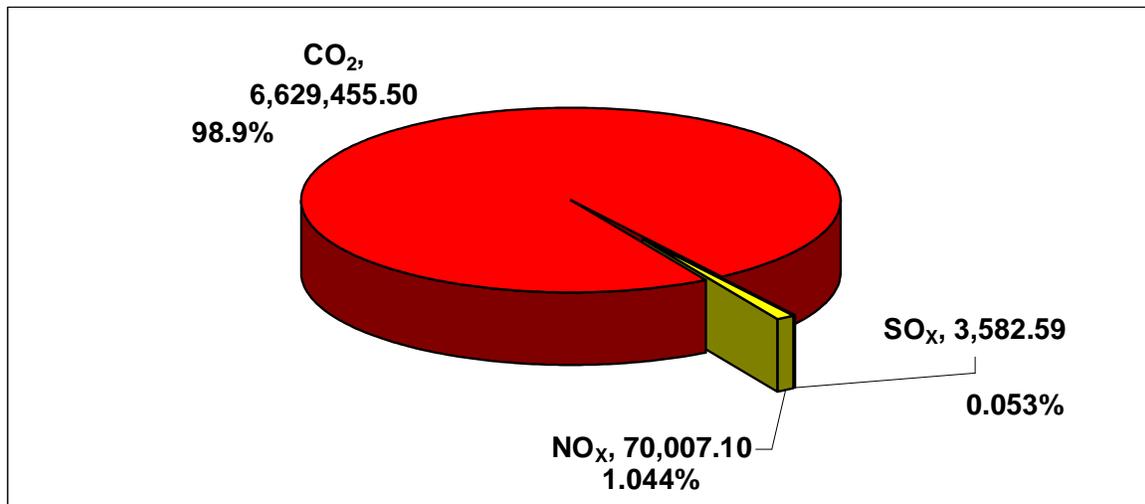
4.1.1 Resultados de la metodología

Con la información señalada anteriormente se obtuvo una primera estimación de las emisiones contaminantes en el aire originadas por la actividad aérea, para ello, los consumos de combustible tanto de turbosina como de gasavión para el año 2010 (Tabla 4.1), fueron multiplicados por los factores unitarios de generación de gases contaminantes establecidos en la Tabla 3.4. Los resultados se presentan en la Tabla 4.2. En la Figura 4.2 se muestra la participación de los principales gases contaminantes generados por la actividad aérea durante 2010, se observa que en particular, el CO₂ es el principal gas de efecto invernadero generado, casi el 99% de las emisiones corresponden a este gas, los otros dos gases, que son considerados como precursores, tienen una contribución mucho menor.

Tabla 4.2 Emisiones contaminantes en 2010 por el consumo de combustibles

Combustible	Cantidad (millones de litros)	Gases contaminantes (toneladas)		
		Dióxido de carbono (CO ₂)	Oxido de azufre (SO _x)	Oxido de nitrógeno (NO _x)
Gasavión	28.67	72,697.27	40.13	768.25
Turbosina	3,220.41	6,556,758.23	3,542.45	69,238.85
Totales	3,249.08	6,629,455.50	3,582.59	70,007.10

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia con base en la Tabla 3.3.

Figura 4.2 Gases contaminantes, en toneladas, generados por la actividad aérea durante 2010

Los principales gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF₆), el trifluoruro de nitrógeno (NF₃), el trifluorometil pentafluoruro de azufre (SF₅CF₃), los éteres halogenados, y otros halocarbonos. Todos estos gases tienen potenciales de calentamiento atmosférico (PCA) identificados. Un PCA compara el forzamiento radiativo de una tonelada de un gas de efecto invernadero en un período de tiempo dado (por ejemplo, 100 años) contra el que genera una tonelada de CO₂. Además, existen otros gases conocidos como precursores, dentro de los que se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), el amoníaco (NH₃), los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂) (IPCC, 2006).

4.2 Segunda metodología

En esta vertiente propuesta se toman en cuenta aspectos no considerados en la anterior, por ejemplo, las distintas etapas de vuelo, el tipo de aeronave y sus motores, o si se trata de vuelos nacionales o internacionales.

4.2.1 Identificación de los aeropuertos de origen y destino

En esta etapa se utilizaron las bases de datos de la DGAC, para el año 2010, las cuales contienen la información de todos los vuelos realizados durante dicho año, desde, hacia o entre los aeropuertos nacionales. Esta información se clasifica en vuelos de la aviación regular nacional e internacional, y de fletamento nacional e internacional.

Al procesar las bases de datos se identificaron 66 aeropuertos nacionales que realizaron operaciones aéreas durante 2010. También, para este año se identificaron 183 aeropuertos internacionales que interactuaron, como orígenes o destinos, con los aeropuertos mexicanos.

En forma agregada se obtuvieron los siguientes resultados:

371,990 vuelos de servicio regular nacional

249,369 vuelos de servicio regular internacional

11,746 vuelos de servicio de fletamento nacional

15,408 vuelos de servicio de fletamento internacional

Estos resultados reflejan que durante 2010 se realizaron en total 648,513 vuelos de los cuales 57.36% correspondieron a la aviación regular nacional, 38.45% a la

regular internacional, 1.81% a la de fletamento nacional y 2.38% a la de fletamento internacional.

Además, se observó que los pares origen-destino con las mayores frecuencias operativas nacionales son: México-Guadalajara, México-Monterrey y México-Cancún, y en los pares internacionales: México-Los Ángeles, Guadalajara-Los Ángeles y México-Houston.

4.2.2 Delimitación de las coordenadas geográficas

Posteriormente, una vez definidos todos los aeropuertos mexicanos y extranjeros que durante 2010 tuvieron operaciones dentro, desde o hacia México, para los cuatros servicios señalados antes, se obtuvieron las coordenadas geográficas de cada uno de ellos.

En particular, se utilizó el punto de referencia de cada aeropuerto (ARP, por sus siglas en inglés, Airport Reference Point). Este punto corresponde al centro geométrico de la pista o pistas en operación de un aeropuerto. En el caso de los aeropuertos mexicanos esta información se obtuvo de SENEAM (2012) y para el caso de los aeropuertos en el extranjero, de sus respectivos sitios en Internet.

Después, con base en las coordenadas de cada aeropuerto se determinaron las distancias ortodrómicas¹² entre cada par de aeropuertos, tanto de servicios nacionales como internacionales, utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.2, que se muestran a continuación, las cuales toman en cuenta la forma esférica de la tierra¹³.

$$d = r \Delta\hat{\sigma} \quad (4.1)$$

En donde d es la distancia entre cada par de aeropuertos s y f ; r es el radio de la tierra, igual a 6,372.8 kilómetros; y $\Delta\hat{\sigma}$ es el ángulo central, en radianes, formado por cada par de aeropuertos; además:

$$\Delta\hat{\sigma} = \arctan \left[\frac{\sqrt{(\cos\theta_f \text{sen}\Delta\lambda)^2 + (\cos\theta_s \text{sen}\theta_f - \text{sen}\theta_s \cos\theta_f \cos\Delta\lambda)^2}}{(\text{sen}\theta_s \text{sen}\theta_f) + (\cos\theta_s \cos\theta_f \cos\Delta\lambda)} \right] \quad (4.2)$$

¹² La distancia más corta entre dos puntos sobre una superficie esférica, medida sobre la superficie de dicha esfera.

¹³ Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Great-circle_distance

En donde $\phi_s, \lambda_s; \phi_f, \lambda_f$ son la latitud y longitud geográfica de cada par de aeropuertos, s y f, respectivamente; y $\Delta\phi, \Delta\lambda$ son las diferencias de dichos valores.

Después de haber estimado las distancias entre todos los pares de aeropuertos, se procedió a determinar para el caso de los servicios internacionales, los tramos y distancias que se sobrevolaron en territorio mexicano, territorio internacional y/o aguas oceánicas. Para estas últimas estimaciones se utilizó un sistema de información geográfica (SIG).

4.2.3 Consumo de combustible unitario

Para estimar la relación combustible consumido/distancia de vuelo, por tipo de aeronave, se utilizó la información de la Guía del Inventario de Emisiones (Emissions Inventory Guidebook, EIG) de CORINAIR¹⁴, la cual es la misma fuente que utiliza la calculadora de la OACI.

Para ello, se determinó para cada par origen-destino el tipo de aeronave que operó y en función de éste su código. Posteriormente, se interpoló este código para obtener su grupo genérico, con lo que se obtuvo la relación señalada. Esta estimación se realizó para todos los pares origen-destino. En el caso de los vuelos internacionales, además, se desglosó el consumo de combustible sobre territorio nacional, otros continentes y/o aguas oceánicas.

4.2.4 Resultados obtenidos

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el procedimiento anterior. Observe que la tabla presenta los valores estimados de los gases contaminantes de los vuelos nacionales e internacionales y las aéreas sobrevoladas en las que se descargaron dichas emisiones.

Se observa que el mayor porcentaje de gases contaminantes corresponde a las emisiones de dióxido de carbono (98.9%), después le sigue el óxido de nitrógeno (1.04%) y finalmente las emisiones de óxido de azufre (0.05%). Estas proporciones porcentuales corresponden a prácticamente los mismos valores que se obtuvieron mediante la primera metodología (Inciso 4.1). Sin embargo, también se observó que en términos absolutos, las estimaciones de la segunda metodología para los tres gases contaminantes considerados, presenta valores más altos (23.8%) que los obtenidos con la primera.

¹⁴ <http://reports.eea.europa.eu/EMEPCORINAIR4/en/page002.html>

Por otro lado, los resultados de esta segunda estimación señalan que la mayor cantidad de emisiones de CO₂ corresponde a los vuelos internacionales (65%) y el resto a los vuelos nacionales (35%).

En cuanto a las zonas sobre las que se generó el dióxido de carbono, la mayor parte corresponde al propio territorio nacional (54%), de este porcentaje la mayor proporción corresponde a los vuelos nacionales (35%) y el restante (19%) a los internacionales. Después, le sigue en importancia la generación de CO₂ sobre aguas oceánicas (21.7%), Norteamérica (18.5%) y Sudamérica (3.3%). Cabe subrayar que el sobrevuelo de todas estas áreas acumula el 97.5% del total de estas emisiones, por lo que, sobre Centroamérica, Europa, el Caribe, Asia y África sólo se genera una reducida cantidad de este gas contaminante (Figura 4.3).

Tabla 4.3 Emisiones estimadas por tipo de vuelo y áreas de sobrevuelo, para el año 2010

Tipo de vuelo	Gases contaminantes estimados (toneladas)		
	Dióxido de carbono (CO ₂)	Oxido de azufre (SO _x)	Oxido de nitrógeno (NO _x)
Vuelos nacionales			
México	2,874,636.3	1,553.1	30,355.9
Subtotal	2,874,636.3	1,553.1	30,355.9
Vuelos internacionales			
México	1,564,090.2	845.0	16,516.7
Norteamérica	1,517,421.6	819.8	16,023.9
Europa	67,338.3	36.4	711.1
Caribe	54,137.7	29.2	571.7
Centroamérica	82,354.2	44.5	869.7
Sudamérica	270,951.7	146.4	2,861.2
Asia	778.4	0.4	8.2
África	110.7	0.1	1.2
Aguas oceánicas	1,781,761.8	962.6	18,815.3
Subtotal	5,338,944.6	2,884.5	56,378.8
Gran total	8,213,580.9	4,437.6	86,734.8

Fuente: Elaboración propia, con base en la metodología establecida.

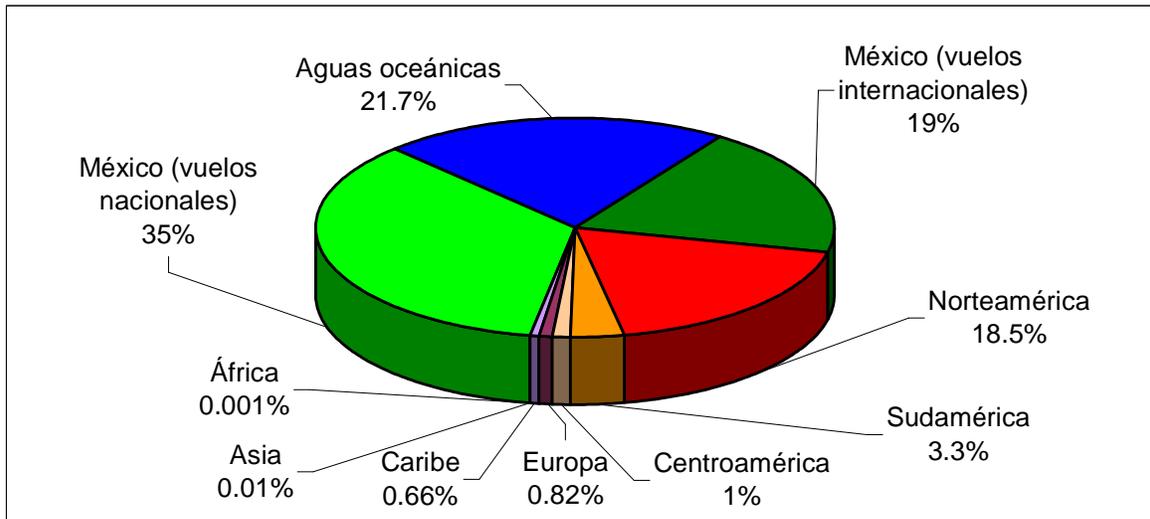
En particular, conviene observar cómo sobre el continente europeo, sólo se genera una cantidad muy reducida (0.82%) de emisiones de CO₂, de los vuelos desde o hacia México.

Como un paso de la acción global para mitigar los impactos de la aviación en el cambio climático, la Unión Europea (UE) impuso un límite a las emisiones de CO₂ generadas por los vuelos desde o hacia los aeropuertos europeos. Desde 2012, las emisiones derivadas de la actividad aérea internacional se incluyeron en el Sistema Europeo de Transacción de Emisiones (European Union Emissions Trading System, EU ETS).

Del mismo modo que las instalaciones industriales que incluye el EU ETS, las aerolíneas tienen asignados límites anuales de emisiones de CO₂ generados por

la operación de sus aeronaves. Los vuelos que llegan a la Unión Europea pueden ser eximidos del sistema de transacción de emisiones si la Unión Europea convalida que el país de origen está tomando medidas para limitar las emisiones originadas por la actividad aérea en dicho país.

Por más de 15 años la Unión Europea ha estado buscando un acuerdo mundial para afrontar el problema de las emisiones originadas por la actividad aérea, a través de la Organización de la Aviación Internacional (OACI) (http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation/index_en.htm).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3 Porcentaje de emisiones de CO₂ generadas por la actividad aérea dentro (vuelos nacionales), desde y hacia México (vuelos internacionales), sobre las distintas áreas sobrevoladas, durante 2010

El planteamiento europeo conlleva cobrar por las emisiones emitidas durante todo el trayecto con origen o destino en la UE, lo cual ha generado debate entre varios países fuera de Europa, debido a que estos argumentan que sólo se debería pagar el impuesto por el CO₂ expulsado a la atmósfera al sobrevolar territorio de la UE. Como se señaló antes, en el caso de la actividad aérea de México con Europa, esta cantidad de emisiones es sólo un porcentaje muy reducido de la actividad total (0.82%).

5 Medidas para atenuar los impactos de los GEI generados por la actividad aérea

5.1 Medidas internacionales

En el ámbito mundial, durante 2012, la aviación civil transportó 2,900 millones de pasajeros, realizó 31 millones de despegues, generó 5.3 billones de pasajeros-kilómetro y 180,000 millones de toneladas de carga-kilómetro y se brindó ayuda humanitaria a millones de personas (<http://www.icao.int>). Aproximadamente el 35% del comercio mundial, en valor económico, se realizó mediante el modo aéreo. Sin embargo, hay un costo ambiental de esta actividad. Aproximadamente el 2% de los gases de efecto invernadero se producen por la aviación mundial. La tecnología resuelve muchos de los problemas que ella crea, por ejemplo, los humos de los motores de aviación se han eliminado, el ruido que generan se ha reducido. En relación con la disminución de las emisiones de CO₂, se está trabajando en las siguientes áreas:

- Mejora en la eficiencia de los combustibles
- Incremento del factor de ocupación de las aeronaves
- Acortamiento de las rutas aéreas
- Reducción de las demoras
- Construcción de aeronaves más ligeras

Los objetivos de la International Air Transport Association (IATA) son: incrementar en 25% la eficiencia del combustible de las aeronaves para el año 2020; estabilizar el impacto ambiental y tener un crecimiento nulo de CO₂ a partir del año 2020; y reducir en un 50% las emisiones de CO₂ para el año 2050, en comparación con las generadas en 2005. La meta a largo plazo es lograr un cero por ciento de emisiones de CO₂. Para ello, hoy en día se están explorando diseños aerodinámicos radicales¹⁵, la utilización de la energía solar en las aeronaves¹⁶, la tecnología de células de combustible, y los biocombustibles

¹⁵ Por ejemplo, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) investiga el concepto de ala integrada (blended wing body) para su potencial utilización en la aviación civil. La forma de este diseño es una combinación del concepto de "ala voladora" y de las aeronaves convencionales. Este concepto minimiza la resistencia al avance de la aeronave, genera un mayor espacio para el alojamiento de los pasajeros y reduce el consumo de combustible por pasajero transportado (<http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/FS-2003-11-81-LaRC.html>).

¹⁶ El proyecto Solar Impulse desarrolló la primera aeronave tripulada que funciona con energía solar. El aparato experimental suizo, es un monoplaza con un peso de 1.6 toneladas, construido con fibra de carbono, su envergadura es de 63.4 metros. Es impulsado con cuatro motores eléctricos de 10 hp cada uno, los cuales son alimentados por 11,628 células fotovoltaicas de silicio monocristalino. Su velocidad promedio de vuelo es de 70 km/h y su techo de 8,500 m. Su primer vuelo se efectuó en 2009. En 2010 el aparato realizó un viaje sin escalas de 26 horas y un año

sostenibles, que no compiten con los cultivos que sirven de alimento para el hombre (<http://www.iata.org>).



Fuente: <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/FS-2003-11-81-LaRC.html>

Figura 5.1 Concepto artístico del diseño de ala integrada



Fuente: <http://www.solarimpulse.com/en/multimedia/pictures/>

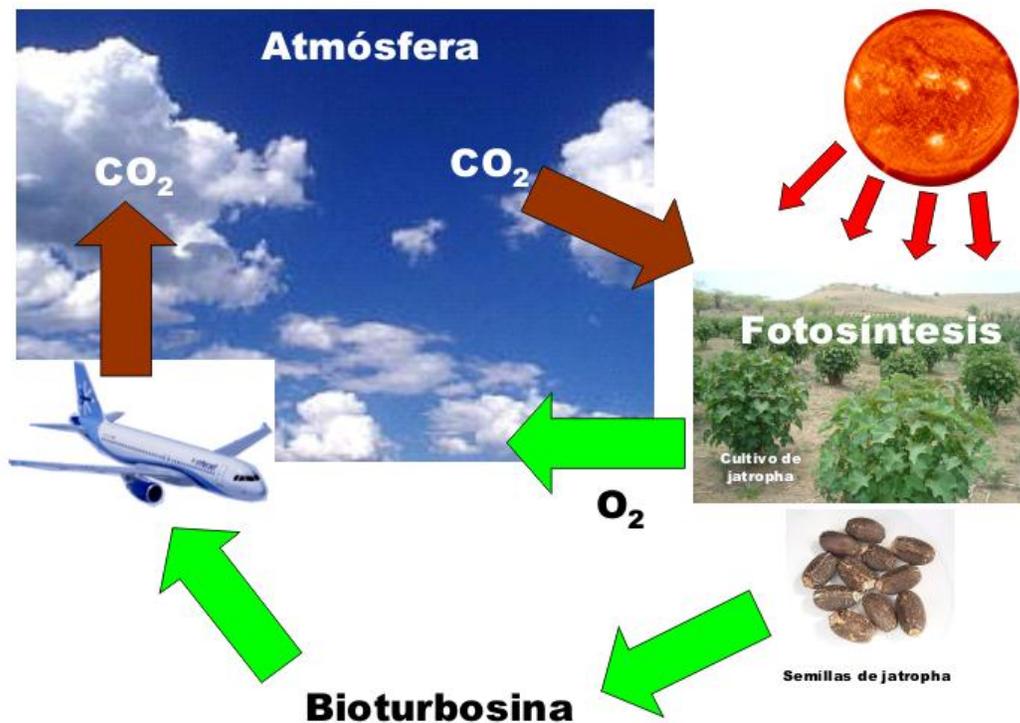
Figura 5.2 Vuelo nocturno del Solar Impulse en Estados Unidos en 2013

después viajó entre Bélgica y Francia. En 2012 tuvo lugar la primera travesía transcontinental de 2,500 km entre Madrid y Rabat. Se tienen planeada una vuelta al mundo con una versión mejorada del avión solar en 2015. El objetivo de este proyecto es promover el uso de las energías limpias (<http://www.solarimpulse.com/>).

5.2 Los combustibles alternos

Los combustibles alternos, en particular, los biocombustibles sostenibles, que han sido identificados por ofrecer soporte al logro de los objetivos establecidos para disminuir las emisiones contaminantes, provienen de cultivos de oleaginosas tales como la jatropha y la camelina, y de las algas, pero también, de la biomasa de la madera y desperdicios. Estas alternativas pueden reducir la huella de carbono hasta en un 80%, considerando todo su ciclo de vida (<http://www.iata.org>).

Al usar biocombustibles en lugar de los combustibles fósiles, derivados del petróleo, se reduce la emisión de GEI, ya que las materias primas, tales como la jatropha, absorbe el CO_2 del aire y por medio de la fotosíntesis lo transforman en raíces, tallos, hojas y semillas. Durante la combustión del biocombustible, el CO_2 es liberado hacia la atmósfera cerrando su ciclo y manteniendo su balance. Al contrario cuando se usan combustibles fósiles, el CO_2 liberado durante la combustión se incorpora a la atmósfera incrementando su concentración (Figura 5.3).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3 El ciclo de la bioturboquina

La reducción de los GEI depende del tipo de biocombustible utilizado y de su mezcla con otros combustibles, por ejemplo, si se usa una mezcla de 20% de biodiesel y el resto de diesel de origen fósil, se reduce en un 15.66 % la emisión

de GEI. De igual forma se reducen las emisiones de hidrocarburos (HC) y de monóxido de carbono (CO). Esto se debe a que el biodiesel contiene 11% más de oxígeno en peso, que el diesel de origen fósil (SEMARNAT et al, 2008).

Entre 2008 y 2011, al menos diez aerolíneas y varios fabricantes de aeronaves realizaron vuelos de prueba con distintas proporciones de biocombustible, llegando a utilizar hasta un 50% de éste y el resto de combustible fósil. Estas pruebas demostraron que el biocombustible es técnicamente confiable y que no se requieren hacer modificaciones a las aeronaves para su utilización; que puede ser mezclado con el combustible fósil; y que en algunos casos los motores que lo utilizaron mejoraron su rendimiento. Desde el verano de 2012 al menos 15 aerolíneas¹⁷ han realizado varios cientos de vuelos utilizando una mezcla de combustible fósil con biocombustible, obtenido de la jatropha, la camelina o de las algas. En todo el mundo grupos de inversionistas de aerolíneas y aeropuertos, fabricantes de aeronaves, gobiernos, productores y proveedores de biocombustibles están trabajando en forma conjunta para el desarrollo de los biocombustibles. Algunos ejemplos son: CAAFI¹⁸ en los Estados Unidos; ABRABA¹⁹ en Brasil; aireg²⁰ en Alemania; Bioqueroseno²¹ en España; y Plan de Vuelo²² en México (<http://www.iata.org/>).

El 1 de abril de 2011, la aviación nacional dio el primer paso hacia el uso de biocombustibles, al realizar el primer vuelo de demostración de un avión comercial con bioturbosina en México. Con 120 pasajeros a bordo, el llamado Ecojet, un Airbus A320-214 de la línea aérea Interjet, despegó del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) con destino al Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez en Chiapas. La bioturbosina fue producida y suministrada por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA).

ASA, suministró 2,340 litros de bioturbosina en uno de los motores, la composición del bioenergético utilizado fue 27% bio-KPS (bio-Keroseno Parafínico Sintetizado) de la semilla denominada jatropha curcas y 73% combustible de origen fósil, cuya mezcla se realizó en las instalaciones de la Estación de Combustibles del AICM bajo estrictos controles de calidad y

¹⁷ KLM, Lufthansa, Finnair, Interjet, Aeroméxico, Iberia, Thomson Airways, Air France, United, Air China, Alaska Airlines, Thai Airways, LAN, Qantas y Jetstar.

¹⁸ <http://www.caafi.org/>

¹⁹ <http://www.abraba.com.br/>

²⁰ <http://www.aireg.de/>

²¹ <http://www.bioqueroseno.es/>

²² <http://plandevuelo.asa.gob.mx/>

seguridad. Previamente, la mezcla de combustibles fue aprobada y certificada por los fabricantes de la aeronave y de los motores, Airbus y CFM International, respectivamente. Cabe señalar, que la materia prima que se utilizó se obtuvo mediante donaciones de productores mexicanos de los Estados de Chiapas, Yucatán, Michoacán y Puebla. Este vuelo fue el séptimo a nivel mundial en su categoría y el segundo en Latinoamérica (http://plandevuelo.asa.gob.mx/es_mx/BIOfurbosina/Vuelo_Demostracion).



Fuente: http://plandevuelo.asa.gob.mx/es_mx/BIOfurbosina/Vuelo_Demostracion

Figura 5.4 Primer vuelo de demostración en México utilizando bioturbosina

Posteriormente, ASA en coordinación con la línea aérea Aeroméxico y el fabricante de aeronaves Boeing, realizaron el primer vuelo transcontinental comercial de pasajeros en un avión de cabina ancha utilizando bioturbosina. El vuelo de itinerario se llevó a cabo el lunes 1 de agosto de 2011, partiendo del AICM con destino a Madrid, España.

El biocombustible fue suministrado nuevamente por ASA, quién dispuso de 26 mil litros de su inventario para el vuelo. Dicho combustible se conformó por una mezcla de 25% Bio-KPS de *Jatropha curcas* y 75% de turbosina, y fue abastecido en el tanque central de la aeronave para ser consumido por los dos motores.



Fuente: http://plandevuelo.asa.gob.mx/es_mx/BIOfurbosina/Primer_Vuelo_Transoceanico_en_el_mundo

Figura 5.5 Primer vuelo transoceánico comercial con bioturbosina

El vuelo se realizó a un mes de haberse oficializado la norma D7566-11 de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), para combustibles de turbina, la cual permite la utilización de la mezcla de combustibles renovables en una proporción de hasta el 50% con combustible

tradicional, lo que da inicio a una nueva era de la aviación mundial ([http://plandevuelo.asa.gob.mx/es_mx/BIOTurbosina/Primer Vuelo Transoceanico en el mundo](http://plandevuelo.asa.gob.mx/es_mx/BIOTurbosina/Primer_Vuelo_Transoceanico_en_el_mundo)).

El 27 de septiembre del 2011, la línea aérea Aeroméxico inició el programa denominado "Vuelos Verdes", evento donde ASA participó como proveedor del biocombustible utilizado. El programa consistió en una serie de 29 vuelos comerciales impulsados con bioturbosina y ejecutados por una aeronave Boeing 737, los cuales de acuerdo al itinerario, partían cada martes cubriendo la ruta México-San José de Costa Rica, con una mezcla al 25% de combustible de origen biológico de camelina y 75% de turbosina fósil. El volumen total suministrado para la ejecución del programa fue de 35,825 litros ([http://plandevuelo.asa.gob.mx/es_mx/BIOTurbosina/Programas de Vuelos Verdes Aeromexico](http://plandevuelo.asa.gob.mx/es_mx/BIOTurbosina/Programas_de_Vuelos_Verdes_Aeromexico)).

5.2.1 Producción de bioturbosina a partir de la jatropha

La jatropha es un arbusto-árbol que se localiza en climas tropicales y semi-tropicales que llega a medir de 1 a 8 metros y se desarrolla en altitudes que van de 5 a 1,500 metros sobre el nivel del mar.

Crece en suelos pobres y arenosos, es resistente a la sequía y la semilla posee un importante contenido de proteína y de grasa, es preciso aclarar que para obtener rendimientos adecuados que permitan hacer un proyecto rentable, en buenas tierras y sin limitaciones de agua pueden obtenerse 5 toneladas de semilla por hectárea, y en tierras marginales sólo se alcanza 1.5 ton.

Es una planta perenne que vive entre 40 y 50 años. Puede comenzar a producir desde el primer año, pero su máximo de producción lo alcanza hasta los 5 años de vida.

Se cultiva en India, África y Centroamérica para obtener biodiesel. En la Península de Yucatán se le conoce por el nombre de "Sikil-Te", también existe en los estados de Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Guerrero, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tamaulipas, Sinaloa y Sonora.

Existen dos variedades de jatropha: una que tiene toxinas y otra que está libre de ellas. Se recomienda trabajar con ésta última, porque su procesamiento es más sencillo e implica menos costos.

Aproximadamente la semilla de jatropha tiene un contenido en peso de 6.6% de agua, 38% de grasa, 32.5% de carbohidratos, 18.2% de proteínas y 4% de cenizas.

La primera etapa en el proceso de producción de biodiesel es la extracción del aceite. Dependiendo de la escala de producción existen dos tipos de extracción.

En pequeña escala por prensado en frío, directamente en el campo o en cooperativas, y en gran escala, usando solventes, dentro de plantas industriales. La eficiencia de la extracción del aceite por prensado es del orden de 70% y mediante solventes es mucho mayor, del orden de 96%. En el primer caso, mediante extracción mecánica se requieren 4.1 kilogramos de semilla para obtener un litro de aceite, en cambio mediante solventes se requieren 2.7 kilogramos de semilla para obtener un litro de aceite. En cuanto al rendimiento por hectárea, después de los 5 años se pueden obtener hasta 5 toneladas de semilla seca por hectárea (<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/biodiesel/produccion-a-partir-de-jatropha.html>).

La IATA señala que si las aerolíneas esperan hasta que el precio de los biocombustibles sea competitivo con el de los combustibles fósiles y que se tenga disponibilidad en cantidades comerciales, los biocombustibles nunca se desarrollarán. Los biocombustibles representan una gran esperanza para la aviación debido a que pueden reducir las emisiones de CO₂ hasta en 80%. Sin embargo, hay varios retos que deben vencerse, aparte de los aspectos técnicos, los biocombustibles deben ser competitivos en cuanto a su precio y en disponibilidad de las cantidades requeridas. Además, los biocombustibles ofrecen la oportunidad para que las naciones generen más ingresos y reduzcan su dependencia de los combustibles fósiles; y posibilitan que las aerolíneas reduzcan su huella de carbono y disminuyan los riesgos asociados con la elevada inestabilidad de los precios del petróleo y de sus derivados (<http://www.iata.org/publications/airlines-international/december-2010/Pages/environment.aspx>).

5.2.2 Características y normas de los biocombustibles

De acuerdo con la IATA los principales requisitos que deben cumplir los combustibles alternos para su uso en la aviación y para que resulten sostenibles son:

- Que puedan mezclarse con los combustibles convencionales, utilicen la misma infraestructura de suministro y no requieran adaptaciones en las aeronaves o en sus motores.
- Que cumplan con las mismas especificaciones de los combustibles fósiles convencionales, en particular, en relación con su resistencia al frío (temperatura de congelación Jet A, -40°C; y Jet A-1, -47°C) y con su contenido de energía (42.8 MJ/kg mínimo).
- Que cumplan con los criterios de sostenibilidad, tales como, reducción de las emisiones de carbono en su ciclo de vida, requerimientos bajos de agua dulce y que no compitan con la producción de alimentos y no generen deforestación.

Es recomendable que los biocombustibles se produzcan a partir de una amplia variedad de fuentes que no sirven de alimento al hombre, por ejemplo, las algas, la camelina, la jatropha y de los desperdicios humanos. Las algas que son organismos simples fotosintéticos, pueden crecer en agua salada o contaminada y pueden producir hasta 250 veces más aceite por unidad de área que los cultivos de soya. La camelina es un cultivo rotativo²³ con el trigo y otros cereales. La jatropha puede crecer en tierras degradadas y es resistente a la sequía (http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Pages/alt-fuels.aspx).

La IATA trabaja con diversas entidades de certificación para establecer los estándares de las nuevas alternativas de combustibles para aviación. Por ejemplo, en 2009 la American Society for Testing Materials (ASTM) aprobó una nueva especificación (ASTM D7566) que permite la utilización de una mezcla de hasta 50% de biocombustible con combustibles fósiles. Los combustibles que satisfagan dicha norma cumplen también con todos los estándares de los combustibles de aviación y se consideran equivalentes al combustible convencional de aviación (definido bajo el ASTM D1655). El estándar 91-91 del Ministerio de Defensa del Reino Unido reconoce también a los combustibles alternos que cumplen con el ASTM D7566. Se espera que entre 2013 y 2014 se incorporen dos combustibles alternos al ASTM D7566, uno con contenido de alcohol (ATJ) y otro de keroseno sintético con contenido de aromáticos (SKA).

El principal reto para el desarrollo pleno de los biocombustibles de aviación no es técnico, sino más bien comercial y político. Actualmente, esta alternativa es más costosa que los combustibles fósiles²⁴, por lo tanto, su demanda es reducida y la inversión en infraestructura para su producción no es atractiva. Por ello, es necesario ofrecer incentivos a los inversionistas para desarrollar estas tecnologías. En Estados Unidos una combinación de incentivos a productores de biocombustibles y agrícolas ha permitido a las aerolíneas comprar biocombustibles de aviación a precios casi competitivos (http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/).

5.3 Huella de carbono en unidades de terreno forestal

La cantidad de hectáreas de terreno forestal necesaria para absorber las emisiones anualizadas de CO₂, se obtiene mediante la siguiente ecuación (Hernández, 2012):

²³ En los cultivos rotativos se cambia lo que se siembra cada vez, para no agotar el suelo. Este sistema de agricultura resulta muy productiva en suelos altamente húmedos y pobres en nutrientes (<http://agriculturaamericana.blogspot.mx>).

²⁴ Se estima que el precio de la bioturbosina es entre tres y cuatro veces mayor que el costo de la turbosina fósil (<http://www.eluniversal.com.mx/finanzas/85481.html> y <http://aerolatinnews.com/2013/05/07/>).

$$\text{Huella de carbono (ha)} = \text{CO}_2\text{-eq (t)} / \text{Factor de absorción (tCO}_2\text{/ha)} \dots(5.1)$$

En donde:

Huella de carbono: Es la cantidad de terreno forestal necesaria (en hectáreas) para absorber las emisiones anualizadas de CO₂.

CO₂-eq: Es el total anual de CO₂ equivalente (en toneladas) considerado en el análisis.

Factor de absorción: Es la cantidad que representa las toneladas de CO₂ que puede absorber anualmente una hectárea de determinado tipo de ecosistema de vegetación. Por ejemplo, un bosque de encino-pino con individuos de 5 a 10 años, en la región del estado de Querétaro, tiene un factor de absorción igual a 40 tCO₂/ha (Manzano y Hernández, 2008).

Sin embargo, se debe tener presente que existen otros ecosistemas que pueden ser considerados para la captura y almacenamiento del carbono, por ejemplo, se ha demostrado (Dávalos et al, 2008) que los agroecosistemas cafetaleros, con sombra diversificada, son sistemas potenciales en la captura de carbono. Estos sistemas representan una opción para los productores de café, no solamente para proporcionar un valor ecológico agregado, al propiciar la captación de carbono sino también para contar con una fuente económica adicional que les permita integrarse al desarrollo sostenible del país. La opción económica adicional a la producción de café que ofrecen dichos ecosistemas es a través del pago de bonos por captura de carbono o por medio de la producción de madera y leña (Peeters et al, 2003). El pago de servicios ambientales por fijación y almacenamiento de carbono representa una opción para dar valor agregado a la producción, que podría tener un gran potencial e importancia para los productores (Ávila et al. 2001, Chomitz, et al, 2007) y, en consecuencia, representa una estrategia que debe ser considerada, diseñada e implementada a corto plazo (Pineda-López et al, 2005).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el inciso 4.2.4, durante 2010 la actividad aérea desde, hacia y dentro de México generó 8,213,580.9 toneladas de CO₂. Por otra parte, si consideramos un factor de absorción de 40 tCO₂/ha, que corresponde a un bosque de encino-pino con individuos de 5 a 10 años y aplicando la ecuación 5.1 se tiene:

$$\text{Huella de carbono} = 8,213,580.9 \text{ tCO}_2 / 40 \text{ tCO}_2\text{/ha} = 205,339.5 \text{ ha}$$

Esta superficie es equivalente a 2,053.3 km², lo que representa aproximadamente el 0.1% del total del territorio nacional.

El Fondo BioCarbon del Banco Mundial (www.biocarbonfund.org) ha invertido 90 millones de dólares en proyectos, de 16 países del mundo (en África, Asia, Europa y Latinoamérica), que han servido para restaurar 150,000 hectáreas de

tierras degradadas y para reducir la deforestación de más de 350,000 hectáreas. Estos proyectos han capturado 15 millones de toneladas de CO₂ (<https://wbcarbonfinance.org/docs/BioCarbon-Fund-Brochure-WebReady.pdf>).

Con estos valores se puede estimar un costo promedio de 6 dólares por tonelada de CO₂ capturada. Por otro lado, otros autores (PEF, 2009, p. 19) estiman que este valor es de alrededor de 8 dólares por tonelada de CO₂ capturada. Considerando un valor promedio de estas estimaciones se obtiene un costo de 7 dólares por tonelada de CO₂ capturada.

De esta forma para neutralizar la huella ambiental derivada de la actividad aérea, se requeriría una inversión de aproximadamente:

$$8,213,580.9 \text{ tCO}_2 \times 7 \text{ dólares/tCO}_2 = 57,495,066.3 \text{ dólares}$$

Si este monto se distribuyera uniformemente entre cada uno de los 50,396,816 pasajeros transportados desde, hacia o dentro nuestro país durante 2010, tendrían que haber pagado adicionalmente 1.14 dólares (aproximadamente 14 pesos) por realizar su viaje, lo cual no representa un incremento significativo del monto que pagan por su boleto de avión y los impuestos respectivos.

Un esquema impositivo de mayor cobertura, además, debería considerar un impuesto asociado con la carga transportada, de esta forma se disminuiría el impuesto ambiental de los pasajeros. Sin embargo, un esquema ideal debería establecer este impuesto ambiental en función de las emisiones generadas en cada ruta, por lo cual cada par origen-destino tendría un monto impositivo específico.

6 Conclusiones y recomendaciones

En los últimos años las emisiones mundiales de GEI se han incrementado significativamente, lo cual ha generado diversos efectos negativos, entre ellos el cambio climático. Durante la última década, los efectos del cambio climático y la degradación ambiental se han intensificado. En México, las sequías, inundaciones y ciclones en este periodo han ocasionado miles de muertes, afectaciones a 13 millones de habitantes y pérdidas económicas por 250 mil millones de pesos. Desafortunadamente, se estima que el cambio climático intensificará los fenómenos hidrometeorológicos extremos y, en consecuencia, se incrementarán los costos de sus impactos, por lo que es necesario iniciar cuanto antes un proceso apropiado de adaptación.

El transporte genera una parte importante de los GEI, por ejemplo, en el caso de México contribuye con el 20% del total de estas emisiones. Las tendencias mundiales señalan que las emisiones de GEI crecerán en función del crecimiento económico.

En México, el autotransporte representa el primer generador de estos gases contaminantes, sin embargo, le sigue en importancia el modo aéreo, a pesar de que su contribución en el transporte de pasajeros y el movimiento de carga es muy reducida.

Dado que el transporte aéreo es un elemento vital para el desarrollo regional y la economía global, es necesario encontrar medios para transformar este servicio en una actividad sostenible en su sentido más amplio, considerando tres perspectivas, la ambiental, la social y la económica.

Se observó que la calculadora de emisiones de la OACI ofrece algunas ventajas, por ejemplo, es muy fácil de utilizar y no requiere mucha información de entrada. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes, por ejemplo, no estima la contaminación generada para un vuelo completo, sólo lo hace en forma individual por pasajero, no considera algunos aeropuertos mexicanos y tampoco desglosa, en el caso de los vuelos internacionales, sobre qué área se generan las emisiones.

El principal gas contaminante que se genera por la combustión de cada litro de combustible de aviación, es el dióxido de carbono. En particular, el gas avión es más contaminante que la turbosina, ya que por cada litro quemado, genera 24.5% más emisiones (en peso) de dióxido de carbono que la turbosina. Afortunadamente, el suministro en México para la actividad aérea corresponde en su mayor parte a la turbosina, por cada 100 litros de combustible de aviación suministrados, poco más de 99 corresponden a la turbosina.

Durante el periodo 2001-2010 se observó una disminución en forma sostenida del consumo de combustible por pasajero transportado, lo cual implica un incremento del rendimiento operacional de las aerolíneas, tanto nacionales como extranjeras.

La primera metodología propuesta es muy simple de aplicar, sólo utiliza la cantidad de combustible suministrada por ASA y aplica los factores de emisiones de gases contaminantes por la combustión de cada litro de gas avión y turbosina, estimados por PEMEX. Como resultado de esta metodología se observó que prácticamente el 99% de las emisiones generadas corresponde a dióxido de carbono y un 1% a óxido de nitrógeno, sólo un porcentaje muy reducido (centésimas de un uno por ciento) corresponde a óxido de azufre.

Debido a que la primera metodología se basa en el consumo total de combustible, sin considerar los diferentes tipos de aeronaves, ni las distancias de vuelo, es menos precisa que la segunda. De los resultados se infiere que la primera alternativa aparentemente subestima la cantidad de emisiones de CO₂ generadas. Por su parte, la segunda metodología, que considera varios factores adicionales en las estimaciones, ofrece teóricamente mayor precisión. Sin embargo, su aplicación es mucho más laboriosa. Por lo anterior, se propone para una línea de investigación futura, desarrollar una calculadora de emisiones de gases contaminantes aplicando la segunda metodología, para sistematizar las estimaciones y obtener los resultados en una forma más ágil, considerando la generación de emisiones totales, pero también su detalle por tipo de servicio y por región.

Los resultados de la segunda metodología señalan que las proporciones porcentuales de gases contaminantes son prácticamente las mismas que fueron estimadas con la primera. Pero, en términos absolutos, las estimaciones de la segunda metodología presenta valores 23.8% más altos que los obtenidos en la primera. Además, se observó que el 65% de las emisiones de CO₂ corresponde a los vuelos internacionales y el 35% a los nacionales. En cuanto a las regiones sobre las que se generaron los gases contaminantes, el 54% correspondió al territorio nacional (35% a vuelos nacionales y 19% a los internacionales). Después, le sigue en importancia la generación de GEI sobre aguas oceánicas (21.7%), Norteamérica (18.5%) y Sudamérica (3.3%). Sobre Centroamérica, Europa, el Caribe, Asia y África sólo se genera una reducida cantidad de estos gases contaminantes (2.5%).

Mediante la segunda metodología, a diferencia de otras, además de obtener la estimación de los GEI totales, se obtiene su desglose para los distintos tipos de servicios y para las distintas regiones sobre las que se generaron.

En el ámbito mundial se han establecido diversas medidas y metas para atenuar los efectos ambientales de las emisiones de CO₂ generadas por la aviación, como por ejemplo, mejorar la eficiencia de los combustibles de aviación, incrementar el factor de ocupación de las aeronaves, acortar las rutas aéreas, reducir las

demoras de las operaciones, y construir aeronaves más ligeras. La meta a largo plazo es lograr un cero por ciento de emisiones de CO₂. Para ello, hoy en día se están explorando diseños aerodinámicos radicales, la utilización de la energía solar en las aeronaves, la tecnología de células de combustible y los biocombustibles sostenibles.

Estos últimos provienen de cultivos de la jatropha, la camelina y de las algas, pero también, de la biomasa de la madera y desperdicios. Estos biocombustibles pueden reducir la huella de carbono hasta en un 80%, considerando todo su ciclo de vida. Cabe señalar que en México existen cultivos de jatropha en varias entidades, con potencial para producir combustible de aviación.

Durante los últimos años varias aerolíneas, incluyendo a las mexicanas, y fabricantes de aeronaves de todo el mundo, han realizado vuelos de prueba y vuelos regulares con biocombustibles. Con ello se ha demostrado que los biocombustibles son técnicamente confiables y que no se requieren hacer modificaciones a las aeronaves para su uso, que pueden ser mezclados con el combustible fósil y que incluso los motores que los utilizaron, en algunos casos, mejoraron su rendimiento.

El principal reto para el desarrollo de los biocombustibles de aviación es comercial y político. Actualmente, esta alternativa es más costosa que los combustibles fósiles, por lo tanto, su demanda es reducida y la inversión en infraestructura para su producción no es atractiva. Por ello, es necesario ofrecer incentivos a los inversionistas para desarrollar estas tecnologías.

Una estimación para el año 2010 de la huella de carbono, de la actividad aérea relacionada con México en unidades de terreno forestal, señala que ésta tiene un valor de 205,339.5 hectáreas, lo cual representa aproximadamente el 0.1% del total del territorio nacional. Otra de las estimaciones señala que si se aplicara un impuesto para neutralizar la huella de carbono, en promedio cada pasajero tendría que pagar un impuesto de aproximadamente 1.14 dólares, lo cual no representa un incremento importante del monto que pagan normalmente los usuarios del transporte aéreo.

Aunque existen enormes retos para reducir las emisiones de CO₂ y atenuar los efectos del cambio climático, las organizaciones internacionales vinculadas con la actividad aérea comercial, como la OACI y la IATA, han estado avanzando con medidas concretas para reducir la huella ecológica de la aviación. Por lo anterior, es importante continuar con un seguimiento periódico que evalúe las emisiones contaminantes de la actividad aérea y los resultados de las medidas tomadas para reducirlas.

Bibliografía

Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA). 1990. Sistema Estadístico Aeroportuario. México.

Ávila Gabriela, Jiménez Francisco, Beer John, Gómez Manuel e Ibrahim Muhammad. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Revista Agroforestería en las Américas. Vol. 8. No. 30. P. 32-35. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/lead/x6349s/x6349s00.pdf>

Conapo. 2006. *Proyecciones de la población de México 2005-2050*. México.

Chomitz Kenneth M., Buys Piet, De Luca Giacomo, Thomas Timothy S. and Wertz-Kanounnikoff Sheila. 2007. At loggerheads?: Agricultural expansion, poverty reduction, and environment in the tropical forests. World Bank policy research report. The World Bank Publications. USA. Disponible en: http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2006/10/19/000112742_20061019150049/Rendered/PDF/367890Loggerheads0Report.pdf

Dávalos Sotelo Raymundo, Rodrigues Morato María I. y Martínez Pinillos-Cueto Enrique. 2008. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad, manejo y conservación. Capítulo 16 Almacenamiento de carbono. Instituto de Ecología A.C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología INE-SEMARNAT. México. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/542/cap16.pdf>

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2011. La Aviación Mexicana en Cifras 1989-2010. México.

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2012. La Aviación Mexicana en Cifras 1991-2011. México.

Gobierno de la República (GR). 2013. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. México.

Flack, R. D. 2005. Fundamentals of Jet Propulsion with Applications, Cambridge, U.K.

Hernández Zea Ana Laura. 2012. Huella de carbono en el transporte para una empresa de distribución de productos químicos (tesis). Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Química. México.

ICAO. 2010. ICAO Carbon Emissions Calculator, Version 3, August 2010. Disponible en: <http://www2.icao.int/en/carbonoffset/Documents/ICAO%20MethodologyV3.pdf>

IPCC. 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES. Japan. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

Manzano Camarillo Mario y Hernández Ramírez Juan Carlos. 2008. Estimación de la captura y almacenamiento de carbono en ecosistemas de la reserva de la Biosfera Sierra Gorda. Disponible en: http://www.katoombagroup.org/~katoomba/documents/events/event19/Captura_y_almacen_de_carbono_MManzano.pdf

Martínez Antonio, J.J. et al. 2012. Manual Estadístico del Sector Transporte 2012. Instituto Mexicano del Transporte. México.

Michaelis Laurie. 1996. OECD, *Annex I Expert Group on the UN FCCC, Policies and Measures for Common Action*. Francia.

Pavri, R. and Moore, G. D. 2001. Gas Turbine Emissions and Control. GE Power Systems, GER-4211. USA.

Peeters Liza Y.K., Soto-Pinto Lorena, Perales Hugo, Montoya Guillermo and Ishiki Mario. 2003. Coffee production, timber and firewood in traditional and Inga-shade plantations in Southern Mexico. *Agriculture Ecosystems and Environment*. Volume 95, Issues 2. 3, May 2003, Pages 481-493. Elsevier.

PICC. 2007. Resumen para responsables de políticas. Cambio Climático 2007: Mitigación del Cambio Climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al 4º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático [B. Metz, O.R. Davison, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Pineda-López Ma. del Rosario, Ortiz-Ceballos Gustavo, Sánchez-Velázquez Lázaro R. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11(2):3-14. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61711201#>

Poder Ejecutivo Federal (PEF). 2009. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. 2009. Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 2009.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO). 2008. Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios

para el aprovechamiento de la bioenergía en México. México. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008e_bioenergia.pdf

Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). 2012. Publicación de Información Aeronáutica (PIA). Enmienda 02/12 (393). México.

Sgouridis Sgouris, Bonnefoy Philippe A, and Hansman R. John. 2011. Air transportation in a carbon constrained world: Long-term dynamics of policies and strategies for mitigating the carbon footprint of commercial aviation. Transportation Research Part A. Elsevier. UK.

Stern, N. 2007. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge Univ. Press, UK. Disponible en: http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_backgroundtoreview.cfm#terms

Sweriduk, G.D., Cheng, V.H.L., and Foyle, D.C. 2011. Models for Aircraft Surface Operations Environmental Analysis. 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. USA.

Anexo 1

"2011, Año del Turismo en México"



Oficio

Fecha

18 de julio de 2011

Remitente DIRECCIÓN CORPORATIVA DE OPERACIONES
GERENCIA DE CONTROL DE GESTION

Número **DCO-GCG-2052 /2011**

Expediente

Destinatario **Lic. Ana Elena Figueroa Giles.**
Titular de la Unidad de Enlace de Petróleos
Mexicanos.
Presente

Antecedentes:

Número(s): DCA-CPGCE-UEPM-963-2011

Número único de expediente:

Fecha(s): 1° de julio de 2011

Asunto: Se remite respuesta a la solicitud de Información
1857200083511

Anexo **X**

En relación al oficio que se menciona en antecedentes, le comento que la Subdirección de Disciplina Operativa, Seguridad, Salud y Protección Ambiental, mediante oficio SDOSSPA-CT-35-2011 de fecha 8 de julio de 2011, proporciona y da respuesta a lo que solicito el particular (mismo que se adjunta).

Lo anterior, con fundamento en el Artículo 42 de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental.

Atentamente,

Lic. Juan Adrian Puig Márquez
Gerente

Anexo 1 (continuación)

"2011, Año del Turismo en México".

Jorge D. S.

Oficio		Fecha: 08 de julio de 2011	
Remilente	Dirección Corporativa de Operaciones Subdirección de Disciplina Operativa, Seguridad, Salud y Protección Ambiental Coordinación Técnica	Número	SDOSSPA-CT-35-2011
Destinatario	Lic. José Antonio Iglesias Pimentel Subgerente de Control Normativo Presente	Antecedentes: Número(s):	DCO-GCG-1798-2011
		Número único de expediente:	
		Fecha(s):	28 de junio de 2011
Asunto:	Solicitud SISI N° 1857200083511	Anexo	<input type="checkbox"/>

En atención a su oficio citado en antecedentes, relacionado con la solicitud SISI N° 1857200083511, donde se requiere:

"Volúmenes de gases contaminantes de turbosina y gasavión".

Otros datos para facilitar su localización:

"Relación de cuanto gas contaminante emite el consumo de un litro de estos combustibles".

Al respecto, le comento que la cantidad estimada de gases de efecto invernadero emitidos por la combustión de 1 litro de gas avión y 1 litro de turbosina es:

Combustible	Dióxido de Carbono (CO2) en kg	Oxidos de Azufre (SOx) en Kg	Oxidos de Nitrógeno (NOx) en Kg
Gas avión	2.536	0.0014	0.0268
Turbosina	2.036	0.0011	0.0215

Cabe aclarar que la cantidad de gases pueden variar dependiendo de la eficiencia de la maquinaria empleada, así como la variación de las condiciones de operación (temperatura, presión, humedad, altura, etc).

Atentamente,

Ing. Cruz Alicia Martínez Rodríguez
E.D.: Subenlace LFTAIPG por la SDOSSPA



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>