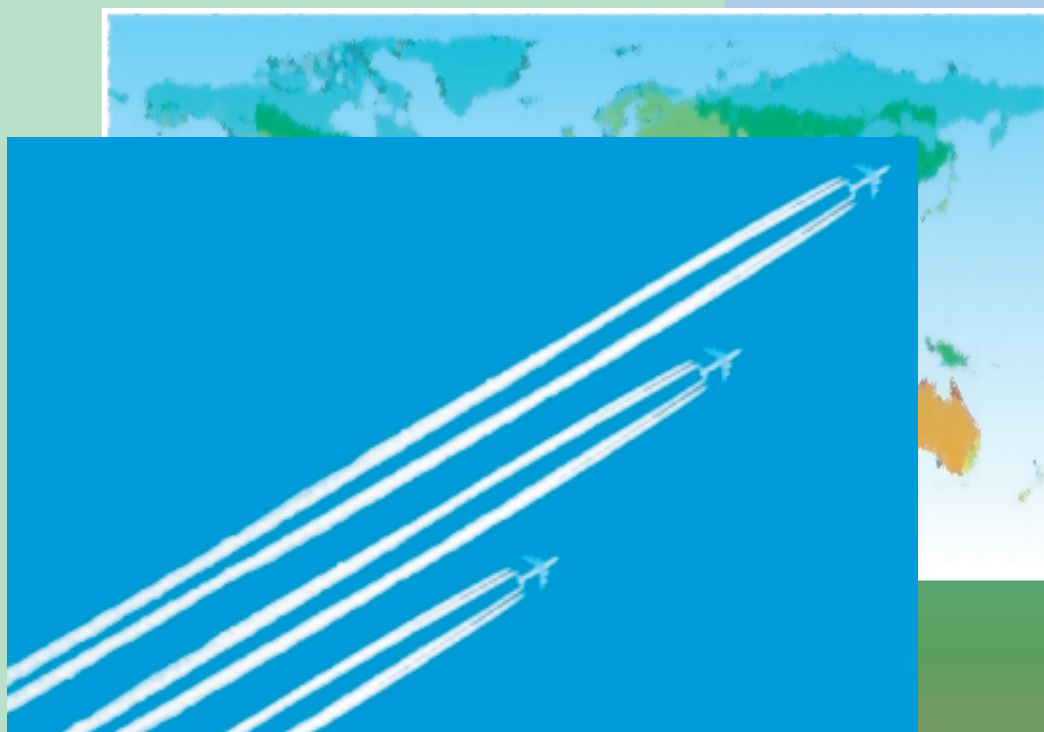




GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO



INFORME ESPECIAL DEL IPCC LA AVIACIÓN Y LA ATMÓSFERA GLOBAL

Resumen para responsables de políticas



**GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS
SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO**



Resumen para responsables de políticas

**La aviación
y la atmósfera global**

Editado por

Joyce E. Penner
Universidad de Michigán

David H. Lister
*Defence Research
and Evaluation Agency*

David J. Griggs
*Oficina Meteorológica
del Reino Unido*

David J. Dokken
*University Corporation
for Atmospheric Research*

Mack McFarland
DuPont Fluoroproducts

Informe especial de los Grupos de trabajo I y III del IPCC

en colaboración con el

Grupo de evaluación científica del Protocolo de Montreal
sobre las sustancias que agotan la capa de ozono

Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

© 1999, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

ISBN: 92-9169-311-1

Traducido al español por la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI)
para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Índice

Preámbulo	v
Prefacio	vii
1. Introducción	3
2. ¿De qué manera las aeronaves afectan al clima y al ozono?	3
3. ¿Cómo se proyecta el aumento de las emisiones de la aviación en el futuro?	6
4. ¿Cuáles son las repercusiones actuales y futuras de la aviación subsónica sobre la fuerza radiante y la radiación ultravioleta?	6
4.1 Dióxido de carbono	6
4.2 Ozono	7
4.3 Metano	7
4.4 Vapor de agua	7
4.5 Estelas de condensación	7
4.6 Nubes cirrus	8
4.7 Aerosoles de sulfatos y hollín	8
4.8 ¿Cuáles son los efectos climáticos generales de las aeronaves subsónicas?	9
4.9 ¿Cuáles son los efectos generales de las aeronaves subsónicas sobre la UV-B?	9
5. ¿Cuáles son los impactos actuales y futuros de la aviación supersónica sobre la fuerza radiante y la radiación UV?	10
6. ¿Cuáles son las opciones para reducir las emisiones y los impactos?	11
6.1 Opciones de la tecnología de las aeronaves y de los motores	11
6.2 Opciones en materia de combustible	11
6.3 Opciones operacionales	12
6.4 Opciones normativas, económicas y otras	12
7. Problemas futuros	13
Lista de publicaciones del IPCC	15

Preámbulo

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1988 conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para: i) evaluar la información disponible sobre la ciencia, los impactos y los aspectos económicos del cambio climático, así como las opciones para mitigarlos y/o adaptarse a los mismos y ii) proporcionar, si se le solicita, asesoramiento científico/técnico/socioeconómico a la Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, de las Naciones Unidas (CMCC). Desde entonces el IPCC ha producido una serie de informes de evaluación, informes especiales, notas técnicas, metodologías y otros materiales que se han convertido en obras de referencia, ampliamente utilizadas por los encargados de la toma de decisiones, los científicos y otros expertos.

Este Informe especial fue preparado a solicitud de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y de las Partes en el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. En el mismo se evalúan y se indican el estado de comprensión de la ciencia pertinente de la atmósfera, la tecnología aeronáutica y los problemas socioeconómicos asociados a las opciones de mitigación tanto en relación con las flotas subsónicas como supersónicas. Están incluidos los efectos potenciales que la aviación ha tenido en el pasado, y que puede tener en el futuro, tanto sobre el agotamiento del ozono estratosférico como sobre el cambio climático global; en cambio, no se abordan los impactos ambientales de la aviación a escala local. El informe sintetiza los resultados para identificar y caracterizar las opciones que podrían mitigar los impactos futuros.

Como es habitual en el IPCC, el éxito en la producción de este informe ha dependido en primer lugar y sobre todo del

entusiasmo y la cooperación de los expertos del mundo entero en las muchas disciplinas conexas pero diferentes.

Quisiéramos manifestar nuestro agradecimiento a todos los autores principales coordinadores, autores principales, autores de las colaboraciones, editores revisores y especialistas. Estas personas han dedicado un tiempo y esfuerzos enormes para producir este informe y les estamos sumamente agradecidos por su compromiso con el proceso del IPCC.

También quisiéramos expresar nuestras sinceras gracias a:

- Robert Watson, Presidente del IPCC y Copresidente del Grupo de evaluación científica del Protocolo de Montreal
- John Houghton, Ding Yihui, Bert Metz y Ogunlade Davidson — Copresidentes de los Grupos de trabajo I y III del IPCC
- Daniel Albritton, Copresidente del Grupo de evaluación científica del Protocolo de Montreal
- David Lister y Joyce Penner, coordinadores de este Informe especial
- Daniel Albritton, John Crayston, Ogunlade Davidson, David Griggs, Neil Harris, John Houghton, Mack McFarland, Bert Metz, Nelson Sabogal, N. Sundararaman, Robert Watson y Howard Wesoky — Comité Directivo de este Informe especial
- David Griggs, David Dokken y todo el personal de los grupos de apoyo técnico de los Grupos de trabajo I y II, que incluye a Mack McFarland, Richard Moss, Anne Murrill, Sandy McCracken, María Noguer, Laura McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden y Flo Ormond, así como Neil Harris que aportó ayuda adicional
- N. Sundararaman, Secretario del IPCC y su personal, Ruurdte Burgeois, Cecilia Tanikie y Chantal Ettori.

G.O.P. Obasi

Secretario General
Organización Meteorológica Mundial

K. Töpfer

Director Ejecutivo
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
y
Director General
Oficina de las Naciones Unidas en Nairobi

Prefacio

En respuesta a un pedido de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) de evaluar las consecuencias de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de motores de las aeronaves, el IPCC en su Duodécimo período de sesiones (México, D.F., 11-13 de septiembre de 1996) decidió producir este Informe Especial, *La aviación y la atmósfera global*, en colaboración con el Grupo de evaluación científica del Protocolo de Montreal. La tarea fue inicialmente responsabilidad de los Grupos de trabajo I y II del IPCC pero, después de un cambio de las atribuciones de los grupos de trabajo (Décimotercer período de sesiones del IPCC o Maldivas o 22 y 25-28 de septiembre de 1997), se transfirió la responsabilidad a los Grupos de trabajo I y III, quedando el apoyo administrativo a cargo de las Unidades de apoyo técnico de los Grupos de trabajo I y II.

Aunque transcurrieron menos de 100 años desde el primer vuelo a motor, la industria aeronáutica ha experimentado un rápido crecimiento y se ha constituido en parte integrante y vital de la sociedad moderna. En ausencia de una intervención normativa, es probable que dicho crecimiento continúe. Es por ello muy pertinente que se examinen los efectos actuales y los posibles en el futuro de las emisiones de motores de aeronaves en la atmósfera. Un aspecto único de este informe es la participación integral de expertos técnicos de la industria aeronáutica, lo cual incluye las líneas aéreas y los fabricantes de células y motores, junto con los científicos especializados en las cuestiones relacionadas con la atmósfera. Esta participación ha sido vital para producir lo que creemos es la evaluación más completa disponible hasta la fecha sobre los efectos de la aviación en la atmósfera global. Aunque este Informe especial es el primer informe del IPCC que examina un subsector industrial determinado, otros sectores merecen igualmente ser estudiados.

El informe considera todos los gases y partículas emitidos por las aeronaves en la atmósfera superior así como el papel que desempeñan en la modificación de las propiedades químicas de la atmósfera y la iniciación de la formación de estelas de condensación y nubes cirrus. El informe pasa luego a considerar *a)* de qué manera las propiedades radiantes de la atmósfera pueden modificarse como resultado de esto, dando lugar posiblemente a un cambio climático, y *b)* de qué manera la capa de ozono puede modificarse, produciendo cambios en la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la tierra. El informe también considera de qué manera las posibilidades de cambios en la tecnología de las aeronaves, las operaciones de transporte aéreo y el marco institucional, reglamentario y económico pueden afectar las emisiones en el futuro. El informe no trata de los efectos de las emisiones de los motores en la calidad del aire local cerca de la superficie.

El objetivo del presente Informe Especial es proporcionar una información precisa, imparcial y políticamente útil que sirva a la industria de la aviación y a la colectividad de expertos y de encargados de establecer las políticas. El informe, al describir el estado actual de conocimientos en la materia, también identifica las esferas en que nuestro entendimiento es inadecuado y en las que se requiere con urgencia más estudio. No formula recomendaciones ni sugiere preferencias políticas, lo cual es acorde con la práctica del IPCC.

Este informe fue preparado por 107 autores principales de 18 países. Se distribuyeron los proyectos de informe sucesivos para su examen por los expertos, a lo que siguió el examen de los gobiernos y otros expertos. Más de 100 otros autores colaboraron presentando proyectos de texto e informaciones a los autores principales y más de 150 revisores presentaron valiosas sugerencias para mejorar el proceso de revisión. Todos los comentarios recibidos fueron analizados cuidadosamente e incorporados en un documento revisado para su consideración en un período conjunto de sesiones de los Grupos de trabajos I y III del IPCC celebrado en San José (Costa Rica), del 12 al 14 de abril de 1999. En el mismo, se aprobó el Resumen para responsables de políticas en detalle y se aceptó el informe correspondiente.

Deseamos expresar nuestro sincero aprecio a los coordinadores del informe, David Lister y Joyce Penner; a todos los autores principales coordinadores, a los autores principales y a los editores revisores cuya competencia, diligencia y paciencia han contribuido a la realización exitosa de este informe; y a los muchos colaboradores y revisores por su valiosa y asidua dedicación y labor. Agradecemos al Comité Directivo por su ilustrado asesoramiento y orientación durante toda la preparación del informe. Estamos agradecidos:

- a la OACI por actuar de anfitriona para la reunión inicial de objetivos para el informe y la reunión de la redacción final, así como por la traducción del Resumen para responsables de políticas a los idiomas español, árabe, chino, francés y ruso (la OACI también proporcionó datos técnicos que se le solicitaron)
- al Gobierno de Trinidad y Tabago por actuar de anfitrión para la primera reunión de redacción
- a la Asociación del Transporte Aéreo Internacional (IATA) por actuar de anfitriona para la segunda reunión de redacción
- al Gobierno de Costa Rica por actuar de anfitrión para el período colectivo de sesiones de los Grupos de trabajo I y III del IPCC (12-14 de abril de 1999), en el que se aprobó el Resumen para responsables de políticas línea por línea y se aceptó la evaluación en que se basa el mismo.

De manera especial estamos reconocidos a John Crayston (OACI), Steve Pollonais (Gobierno de Trinidad y Tabago), Leonie Dobbi (IATA) y Max Campos (Gobierno de Costa Rica) por haberse hecho cargo de la laboriosa tarea de la organización de estas reuniones.

Agradecemos igualmente a Anne Murrill de la Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo I y a Sandy MacCracken de la Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo II por su infatigable y amable apoyo a lo largo de toda la preparación del informe. Otros miembros de las Unidades de apoyo técnico de los Grupos de trabajo I y II también aportaron gran ayuda, entre los que se cuentan Richard Moss, Mack McFarland, María Noguera, Laura Van Wie McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden y Flo Ormond. El personal de la Secretaría del IPCC, Ruurdte Bourgeois, Cecilia Tanikie y Chantal Etori,

proporcionaron el apoyo logístico para todos los enlaces gubernamentales y el viaje de los expertos de países en desarrollo y de economías en transición.

Robert Watson, Presidente del IPCC

John Houghton, Copresidente del Grupo de trabajo I del IPCC

Ding Yihui, Copresidente del Grupo de trabajo I del IPCC

Bert Metz, Copresidente del Grupo de trabajo III del IPCC

Ogunlade Davidson, Copresidente del Grupo de trabajo III del IPCC

N. Sundararaman, Secretario del IPCC

David Griggs, Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo I del IPCC

David Dokken, Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo II del IPCC

RESUMEN PARA RESPONSABLES DE POLÍTICAS

LA AVIACIÓN Y LA ATMÓSFERA GLOBAL

Informe especial de los Grupos de trabajo I y III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

Este resumen, aprobado en detalle en un período conjunto de sesiones de los Grupos de trabajo I y III del IPCC (San José, Costa Rica o 12-14 de abril de 1999), representa la declaración oficial convenida del IPCC respecto a la comprensión actual de la aviación y la atmósfera global

Basado en un texto preparado por:

David H. Lister, Joyce E. Penner, David J. Griggs, John T. Houghton, Daniel L. Albritton, John Begin, Gerard Bekebrede, John Crayston, Ogunlade Davidson, Richard G. Derwent, David J. Dokken, Julie Ellis, David W. Fahey, John E. Frederick, Randall Friedl, Neil Harris, Stephen C. Henderson, John F. Hennigan, Ivar Isaksen, Charles H. Jackman, Jerry Lewis, Mack McFarland, Bert Metz, John Montgomery, Richard W. Niedzwiecki, Michael Prather, Keith R. Ryan, Nelson Sabogal, Robert Sausen, Ulrich Schumann, Hugh J. Somerville, N. Sundararaman, Ding Yihui, Upali K. Wickrama, Howard L. Wesoky

1. Introducción

El presente informe evalúa los efectos de las aeronaves sobre el clima y el ozono atmosférico y constituye el primer informe del IPCC relativo a un subsector industrial específico. Fue preparado por el IPCC en colaboración con el Grupo de evaluación científica del Protocolo de Montreal sobre las sustancias que agotan la capa de ozono en respuesta a una solicitud de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI)¹ debido al impacto potencial de las emisiones de la aviación. Se trata de las emisiones antropógenas predominantes aportadas directamente a la tropósfera superior y a la estratósfera inferior.

La aviación ha experimentado una rápida expansión a medida que la economía mundial ha crecido. El tráfico de pasajeros (expresado como pasajeros-kilómetros de pago²) ha aumentado desde 1960 a un ritmo anual cercano al 9%, o sea, 2,4 veces la tasa media de crecimiento del producto interno bruto (PIB). El tráfico de carga, aproximadamente 80% del cual se realiza en los aviones de pasajeros, también ha crecido en el mismo período. La tasa de crecimiento del tráfico de pasajeros ha disminuido a alrededor del 5% en 1997 a medida que la industria ha ido madurando. Las emisiones totales de la aviación se han incrementado, debido a que el aumento de la demanda en el transporte aéreo ha superado las reducciones específicas³ por las continuas mejoras de la tecnología y los procedimientos operacionales. Las proyecciones del tráfico de pasajeros, en la hipótesis de una demanda no limitada, indicarían un crecimiento a tasas que superarían al PIB en el período de evaluación objeto de este informe.

En este informe se examinan los efectos de la aviación actual y una gama de proyecciones de crecimiento no limitado de la aviación (lo cual incluye al transporte de pasajeros y carga y las operaciones militares), incluyendo los efectos posibles de una flota de aeronaves supersónicas comerciales de la segunda generación. El informe describe igualmente la tecnología aeronáutica actual, los procedimientos de operación y las opciones para mitigar el impacto futuro de la aviación sobre la atmósfera global. El informe no considera los efectos ambientales locales de las emisiones de los motores de las aeronaves ni ningún efecto ambiental indirecto de las operaciones aéreas como el uso de energía por el transporte terrestre en los aeropuertos.

2. ¿De qué manera las aeronaves afectan al clima y al ozono?

Las aeronaves emiten gases y partículas directamente en la troposfera superior y en la estratósfera inferior donde tienen un efecto sobre la composición de la atmósfera. Estos gases y partículas alteran la concentración de los gases atmosféricos de efecto invernadero, que incluyen al dióxido de carbono (CO₂), al ozono (O₃) y al metano (CH₄), desencadenan la formación de estelas de condensación y pueden aumentar la cuantía de nubes cirrus, todo lo cual contribuye al cambio climático (véase el Cuadro 1).

Las principales emisiones de las aeronaves incluyen los gases de efecto invernadero, dióxido de carbono y vapor de agua (H₂O). Otras emisiones importantes son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) (que de modo colectivo se los denomina NO_x), los óxidos de sulfuro (SO_x) y el hollín. La cantidad total de combustible de aviación quemado, así como el total de las emisiones de dióxido de carbono, NO_x y vapor de agua de las aeronaves y su relación con otros parámetros importantes de esta evaluación son bien conocidas.

Los impactos climáticos de los gases y de las partículas emitidas y creadas debido a la aviación son más difíciles de cuantificar que las emisiones; sin embargo, pueden compararse entre sí y con otros efectos climáticos causados por otros sectores utilizando el concepto de fuerza radiante⁴. Debido a que el dióxido de carbono tiene larga duración atmosférica (~100 años) y de ese modo se mezcla bien en toda la atmósfera, los efectos de las emisiones de las aeronaves no se pueden distinguir de la misma cantidad de dióxido de carbono emitida por cualquier otra fuente. Los otros gases (p.ej., NO_x, SO_x, vapor de agua) y partículas tienen una permanencia atmosférica más breve y se mantienen concentrados cerca de las rutas de vuelo, principalmente en las latitudes septentrionales medianas. Estas emisiones pueden dar lugar a una fuerza radiante que está situada regionalmente cerca de las rutas de vuelo para algunos componentes (p.ej., el ozono y las estelas de condensación) en contraste con las emisiones que están combinadas globalmente (p.ej., el dióxido de carbono y el metano).

El cambio climático global medio está razonablemente bien representado por la fuerza radiante media global, por ejemplo al evaluarse la contribución de la aviación al incremento de la temperatura media mundial o del nivel del mar. No obstante, debido a que algunas contribuciones clave a la fuerza radiante están localizadas principalmente en las latitudes medias septentrionales, la respuesta climática regional puede diferir de la dimanante de una fuerza radiante media global. El impacto de las aeronaves sobre el clima regional podría ser importante pero no se ha evaluado en este informe.

¹ La OACI es el organismo especializado de las Naciones Unidas al que incumbe la responsabilidad mundial de establecer normas, métodos recomendados y orientación sobre los diversos aspectos de la aviación civil internacional, lo cual incluye la protección del medio ambiente.

² El ingreso por pasajero-kilómetro constituye una medida del tráfico transportado por la aviación comercial: el ingreso que produce un pasajero transportado por 1 km.

³ Emisiones específicas son las emisiones por unidad de tráfico transportado, por ejemplo, por pasajero-km de pago.

⁴ La fuerza radiante es una medida de la importancia de un mecanismo potencial de cambio climático. Expresa la perturbación o cambio del equilibrio energético del sistema Tierra-atmósfera en watts por metro cuadrado (Wm⁻²). Los valores positivos de la fuerza radiante implican un calentamiento neto mientras que los negativos implican enfriamiento.

La ciencia del cambio climático

Se presentan a continuación algunas de las principales conclusiones del Resumen para los encargados de formular las políticas del Informe de la segunda evaluación del Grupo de Trabajo I del IPCC publicado en 1995, que trata de los efectos de todas las emisiones de origen antropógeno sobre el cambio climático:

- El aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero desde la era preindustrial (o sea, aproximadamente 1750) ha dado lugar a una fuerza radiante positiva del clima, que tiende a calentar la superficie de la Tierra y producir otros cambios climáticos.
- Las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero: dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, entre otros, han aumentado considerablemente en alrededor del 30%, 145% y 15% respectivamente (valores correspondientes a 1992). Estas tendencias pueden atribuirse en gran parte a la actividad humana, principalmente el uso de combustible fósiles, cambios en el uso de las tierras y la agricultura.
- Muchos gases de efecto invernadero se mantienen en la atmósfera por largo tiempo (para el dióxido de carbono y el óxido nitroso, de muchos decenios a siglos). Como resultado de ello, si las emisiones de dióxido de carbono se mantuvieran cerca de los niveles actuales (1994), esto daría lugar a una tasa constante de aumento de las concentraciones atmosféricas por dos siglos por lo menos, llegando a unos 500 ppmv (aproximadamente el doble de la concentración preindustrial de 280 ppmv) para fines del siglo XXI.
- Los aerosoles troposféricos resultantes de la quema de combustibles fósiles, de biomasa y de otras fuentes han dado lugar a una fuerza radiante negativa que, si bien se concentra en determinadas regiones y zonas subcontinentales, puede tener efectos continentales a hemisféricos en las configuraciones climáticas. En contraste a la larga duración de los gases de efecto invernadero, los aerosoles antropógenos son de muy corta vida en la atmósfera; de ahí que su fuerza radiante se ajuste rápidamente a los aumentos o disminuciones de las emisiones.
- Basándose en el registro del clima observado, nuestra capacidad para cuantificar la influencia humana sobre el clima global es limitada actualmente, debido a que el indicio previsto está surgiendo todavía de entre el “ruido” de la variabilidad natural y debido a que hay incertidumbre en los factores clave. Éstos incluyen la magnitud y las características de la variabilidad natural a largo plazo y la característica de la evolución en el tiempo de la fuerza radiante debida a los cambios de las concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles y en reacción a éstos, y los cambios en las superficies de los terrenos. Con todo, el resto de la evidencia sugiere que hay una influencia humana discernible sobre el clima global.
- El IPCC ha elaborado una serie de escenarios, IS92a-f, para las emisiones futuras precursoras de gases de efecto invernadero y aerosoles, basándose en hipótesis relativas al crecimiento demográfico y económico, la utilización de las tierras, los cambios tecnológicos, la disponibilidad de energía y mezclas de combustibles durante el período 1990 a 2100. Mediante la comprensión del ciclo global del carbono y de la química de la atmósfera, estas emisiones pueden utilizarse para formular proyecciones de concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y aerosoles y la perturbación de la fuerza radiante natural. Podrán utilizarse entonces modelos de climas para elaborar proyecciones del clima futuro.
- Se estima que la temperatura media global del aire en superficie para el 2100 aumente de 1°C a 3,5°C con respecto a 1990 en los escenarios IS92. En todos los casos, el índice medio de calentamiento sería probablemente superior al visto en los últimos 10.000 años. Los cambios de las temperaturas regionales podrían diferir considerablemente del promedio mundial y los cambios reales anuales a decenales incluirían una considerable variabilidad natural. Se prevé que un calentamiento general dé lugar a un aumento de sucesos de días sumamente calurosos y a una disminución de sucesos de días sumamente fríos.
- Se prevé que el nivel medio del mar aumente como consecuencia de la expansión térmica de los océanos y de la fusión de los glaciares y mantos de hielo. Se estima que el aumento del nivel del mar para el 2100 sea de 15 cm a 95 cm con respecto a 1990 en los escenarios IS92.
- Las temperaturas más cálidas darán lugar a un ciclo hidrológico más vigoroso; esto se traduce en perspectivas de sequías más graves y/o inundaciones en algunos lugares y sequías y/o inundaciones menos graves en otros. Varios modelos indican un aumento en la intensidad de las precipitaciones, sugiriendo la posibilidad de sucesos más extremos de lluvias.

Cuadro 1: Resumen de los futuros escenarios relacionados con las aeronaves considerados en este informe

Nombre del escenario	Crecimiento medio anual del tránsito (1990–2050) ¹	Crecimiento medio anual de la tasa de consumo (1990–2050) ²	Tasa media anual de crecimiento económico 1990–2025 2.3% 1990–2100	Tasa media anual de crecimiento demográfico 1990–2025 0.7% 1990–2100	Relación del tráfico (2050/1990)	Relación del consumo de combustible (2050/1990)	Observaciones
Fa1	3.1%	1.7%	2.9% 1990–2025 2.3% 1990–2100	1.4% 1990–2025 0.7% 1990–2100	6.4	2.7	Escenario de referencia elaborado por el Grupo de pronóstico y apoyo económico de la OACI (FESG); crecimiento económico de gama mediana del IPCC (1992); tecnología para la eficiencia mejorada del uso de combustible y reducción del NO _x
Fa1H	3.1%	2.0%	2.9% 1990–2025 2.3% 1990–2100	1.4% 1990–2025 0.7% 1990–2100	6.4	3.3	Escenario de tránsito y tecnología Fa1 con una flota de aeronaves supersónicas que reemplazan algunas de la flota subsónica
Fa2	3.1%	1.7%	2.9% 1990–2025 2.3% 1990–2100	1.4% 1990–2025 0.7% 1990–2100	6.4	2.7	Escenario de tránsito Fa1; tecnología con mayor énfasis en la reducción del NO _x pero una mejora ligeramente más pequeña de la eficiencia en el uso del combustible
Fc1	2.2%	0.8%	2.0% 1990–2025 1.2% 1990–2100	1.1% 1990–2025 0.2% 1990–2100	3.6	1.6	Escenario del FESG de bajo crecimiento del tránsito, tecnología según el escenario Fa1
Fe1	3.9%	2.5%	3.5% 1990–2025 3.0% 1990–2100	1.4% 1990–2025 0.7% 1990–2100	10.1	4.4	Escenario del FESG de gran crecimiento del tránsito, tecnología según el escenario Fa1
Eab	4.0%	3.2%			10.7	6.6	Escenario de crecimiento del tránsito basado en IS92a elaborado por el Fondo de Defensa Ambiental (EDF); hipótesis de una tecnología de NO _x muy bajo
Edh	4.7%	3.8%			15.5	9.4	Escenario del EDF de elevado crecimiento del tránsito; hipótesis de una tecnología de NO _x muy bajo

¹ Tráfico medido en términos de pasajeros-km de pago.

² Todo tipo de vuelo (pasajeros, carga y militar).

El ozono es un gas de efecto invernadero. También protege la superficie de la Tierra de la perjudicial radiación ultravioleta (UV), y es un contaminante común del aire. El NO_x emitido por las aeronaves actúa en la química del ozono. Las aeronaves subsónicas vuelan en la troposfera superior y en la estratósfera inferior (a altitudes que varían entre 9 y 13 km), mientras que las aeronaves supersónicas a varios kilómetros más arriba (a altitudes de entre 17 y 20 km) en la estratósfera. Se considera que el ozono de la troposfera superior y la estratósfera inferior aumente en respuesta al incremento de NO_x y que el metano disminuya. A altitudes más elevadas, el aumento de NO_x da lugar a la disminución del ozono en la capa estratosférica. La permanencia de los

precursores del ozono (NO_x) en estas regiones aumenta con la altitud y de ahí que las perturbaciones del ozono provocadas por las aeronaves dependan de la altitud de la inyección de NO_x y varíen de regionales en la tropósfera a globales en la estratósfera.

El vapor de agua, el SO_x (que forma partículas de sulfatos) y el hollín⁵ desempeñan papeles tanto directos como indirectos en el cambio climático y la química del ozono.

⁵ Tanto las partículas en el aire de sulfatos como de hollín constituyen ejemplos de aerosoles. Los aerosoles son partículas microscópicas suspendidas en el aire.

3. ¿Cómo se proyecta el aumento de las emisiones de la aviación el futuro?

Se prevé que la demanda mundial de viajes aéreos de pasajeros, medida en pasajeros-km de pago, aumente en un 5% anual entre 1990 y 2015, mientras que el uso total de combustible de aviación —lo cual incluye el destinado al transporte de pasajeros y carga y a operaciones militares⁶— aumente a razón de 3% por año, en el mismo período, la diferencia se debe principalmente a la eficiencia mejorada de las aeronaves. Las proyecciones más allá de este plazo son más inciertas, de modo que en este informe se examina una serie de escenarios de futuras emisiones no limitadas (véanse la Tabla 1 y la Figura 1). Todos estos escenarios se basan en la hipótesis de que las mejoras tecnológicas conducentes a emisiones reducidas por pasajero-km de pago continuarán en el futuro y que para 2050 se logrará el uso óptimo de disponibilidad del espacio aéreo (o sea, una gestión ideal del tránsito aéreo). Si estas mejoras no se materializan, el uso del combustible y las emisiones serán entonces mayores. Se presume además que el número de aeronaves así como el de los aeropuertos e infraestructuras conexas continuarán aumentando y no limitarán el crecimiento de la demanda de viajes aéreos. Si no se dispusiera de infraestructura, el crecimiento del tráfico reflejado en estos escenarios no se materializaría.

La reunión IPCC (1992)⁷ formuló una serie de escenarios, IS92a-f, de las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles precursores, basándose en hipótesis

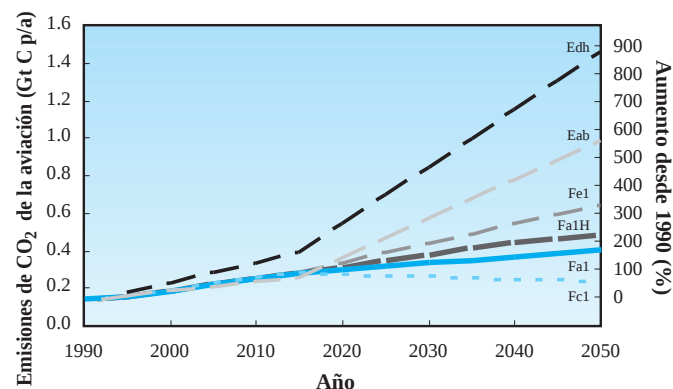


Figura 1: Total de las emisiones de dióxido de carbono de la aviación resultantes de seis diferentes escenarios relativos al uso de combustible de aviación. Las emisiones se indican en Gt C (o sea, 1 000 millones (10⁹) de toneladas de carbono) por año. Para convertir las Gt C a Gt CO₂ multiplicar por 3,67. La escala del eje derecho representa el porcentaje de crecimiento de 1990 a 2050. Las emisiones de aeronaves de dióxido de carbono representa 2,4% del total de emisiones de combustible fósil de dióxido de carbono en 1992 o el 2% del total de emisiones de dióxido de carbono antropogénicas. (Nota: no se ha ilustrado el Fa2 debido a que la diferencia con respecto al escenario Fa1 no sería discernible en la Figura 1).

relativas al crecimiento demográfico y económico, utilización de las tierras, cambios tecnológicos, disponibilidad de energía y combinaciones de combustibles durante el período 1990 a 2100. El escenario IS92a es uno de emisiones de gama mediana. Los escenarios de emisiones futuras no constituyen predicciones del futuro. Son inciertos por naturaleza debido a que se basan en diferentes hipótesis respecto al futuro y cuanto más extenso es el horizonte del tiempo tanto más inciertos serán los escenarios. Los escenarios de emisiones de aeronaves formulados aquí emplean las hipótesis de crecimiento económico y demográfico que aparecen en la serie IS92 (véanse la Tabla 1 y la Figura 1). En las secciones que siguen, el escenario Fa1 se utiliza para ilustrar los efectos posibles de las aeronaves y se le denomina escenario de referencia. Sus hipótesis están ligadas a las del IS92a. Los otros escenarios de emisiones de aeronaves se formularon a partir de una gama de proyecciones económicas y demográficas de los IS92a-e. Estos escenarios representan una gama de crecimiento plausible de la aviación y proporcionan la base del análisis de sensibilidad para establecer modelos de climas. No obstante, se considera que el escenario de gran crecimiento Edh sea menos plausible y que el escenario Fc1 de escaso crecimiento probablemente sea excedido dado el estado actual de la industria y la evolución planeada.

4. ¿Cuáles son repercusiones actuales y futuras de la aviación subsónica sobre la fuerza radiante y la radiación ultravioleta?

En las Figuras 2 y 3 se presenta un resumen de los efectos radiantes resultantes de las emisiones de los motores de las aeronaves. Como se indica en la Figura 2, la incertidumbre relativa a varios de estos efectos es grande.

4.1 Dióxido de carbono

Las emisiones de dióxido de carbono de las aeronaves fueron de 0,14 Gt C/año en 1992. Esto es alrededor del 2% del total de las emisiones antropógenas de dióxido de carbono en 1992 o un 13% de las emisiones de dióxido de carbono de todas las fuentes de transporte. En la serie de escenarios que se consideran aquí las proyecciones indican que las emisiones de dióxido de carbono de las aeronaves continuarán aumentando y que en 2050 serán de 0,23 a 1,45 Gt C/año. Para el escenario de referencia (Fa1) esta emisión aumenta al triple en 2050

⁶ La proporción conocida del consumo de combustible de las aeronaves civiles (para pasajeros y carga) y militares era, respectivamente, de 64% y 36% en 1976, así como de 82% y 18% en 1992. Las proyecciones tienden a que esto cambie a 93% y 7%, respectivamente, en 2015 y a 97% y 3% en 2050.

⁷ IPCC, 1992: *Cambio Climático 1992: Informe complementario para la evaluación científica del IPCC* [Houghton, J.T., B.A. Callander, y S.K.Varney (autores.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 200 págs.

a 0,40 Gt C/año, o sea 3% de las emisiones totales de dióxido de carbono antropógenas proyectadas en relación con el escenario de emisiones de gama intermedia del IPCC (IS92a). Para la gama de escenarios, el aumento de las emisiones de dióxido de carbono hasta 2040 sería de 1,6 a 10 veces el valor de 1992.

Las concentraciones actuales del dióxido de carbono y la fuerza radiante del mismo son los que resultan de las emisiones de los últimos 100 años, más o menos. La concentración de dióxido de carbono atribuible a la aviación en la atmósfera de 1992 es de 1 ppmv, poco menos del 1% del aumento total antropógeno. Este porcentaje es inferior al de las emisiones (2%) debido a que éstas ocurrieron apenas en los últimos 50 años. Para la serie de escenarios de la Figura 1, se prevé que la acumulación de dióxido de carbono atmosférico debido a las aeronaves aumente de 5 a 13 ppmv en los 50 próximos años. Para el escenario de referencia (Fa1) esto es el 4% del de todas las actividades humanas según la hipótesis del escenario IPCC de gama mediana (IS92a).

4.2 Ozono

Se estima que las emisiones de NO_x provenientes de las aeronaves subsónicas en 1992 han aumentado las concentraciones de ozono en las altitudes de crucero de latitudes septentrionales medianas, hasta un 6% en comparación con una atmósfera sin emisiones de aeronaves. Se prevé que este aumento del ozono se incremente en un 13% en 2050 en el escenario de referencia (Fa1). El impacto de las concentraciones de ozono en otras regiones del mundo es considerablemente menor. Estos aumentos, en promedio, tenderán a calentar la superficie de la Tierra.

Las emisiones de NO_x de las aeronaves son más eficaces para producir ozono en la troposfera superior que una cantidad equivalente de emisión en la superficie. También los aumentos de ozono en la troposfera superior son más eficaces para incrementar la fuerza radiante que aumenta a altitudes más bajas. Se prevé que debido a estos aumentos la columna total calculada de ozono de las latitudes septentrionales medianas crezca aproximadamente 0,4% y 1,2% en 1992 y 2050, respectivamente. No obstante, las emisiones de sulfuro y agua de las aeronaves en la estratósfera tienden a agotar el ozono, compensando parcialmente los aumentos del ozono inducidos por el NO_x . El grado en que ocurre esto no está todavía cuantificado. Por lo tanto, el impacto de las emisiones de las aeronaves subsónicas en el ozono estratosférico necesita una evaluación adicional. Se calcula que los más grandes aumentos de concentraciones de ozono debido a las emisiones de las aeronaves ocurran cerca de la tropopausa donde la variabilidad natural es elevada. Dichos cambios no son evidentes según las observaciones actuales.

4.3 Metano

Además de aumentar las concentraciones del ozono troposférico, se prevé que las emisiones NO_x de las aeronaves

disminuyan la concentración del metano (CH_4), que es también un gas de efecto invernadero. Estas reducciones del metano tienden a enfriar la superficie de la Tierra. Se calcula que la concentración de metano en 1992 sea un 2% inferior al de una atmósfera sin aeronaves. Esta reducción de la concentración del metano inducida por las aeronaves es 2,5 veces inferior al aumento general observado desde los tiempos preindustriales. La incertidumbre de las fuentes y la velocidad de disminución del metano impiden verificar el impacto de la aviación sobre las concentraciones de metano mediante observaciones atmosféricas. En el escenario de referencia (Fa1), el metano sería un 5% menor que el calculado para una atmósfera del año 2050 sin aeronaves.

Los cambios en el ozono troposférico se producen principalmente en el hemisferio norte, mientras que los del metano son mundiales en su extensión de modo que, aun cuando las fuerzas radiantes medias mundiales sean de magnitud análoga y de signo opuesto, la estructura de las latitudes en las fuerzas es diferente, de forma que los efectos radiantes regionales netos no se anulan.

4.4 Vapor de agua

Las emisiones de vapor de agua de las aeronaves subsónicas se liberan en su mayoría en la troposfera donde se eliminan rápidamente por la precipitación dentro de un lapso de 1 ó 2 semanas. Una fracción pequeña de las emisiones de vapor de agua se libera en la estratósfera inferior donde puede acumularse hasta formar concentraciones más grandes. Debido a que el vapor de agua es un gas de efecto invernadero, estos aumentos tienden a calentar la superficie de la tierra, aunque para las aeronaves subsónicas este efecto es más pequeño que los de otras emisiones de aeronaves como el dióxido de carbono y el NO_x .

4.5 Estelas de condensación

En 1992, se estima que las estelas de condensación de las aeronaves cubren aproximadamente el 0,1% de la superficie de la Tierra sobre una base media anual con valores regionales más grandes. Las estelas de condensación tienden a calentar la superficie de la tierra, de manera análoga a las nubes finas en altura. Se prevé que la cobertura de estelas de condensación aumente a 0,5% en 2050 en el escenario de referencia (Fa1), a un ritmo que es más rápido que la tasa de crecimiento del consumo de combustible de aviación. Este crecimiento más rápido de la cobertura de estelas de condensación está previsto debido a que el tránsito aéreo aumentará principalmente en la troposfera superior donde las estelas de condensación se forman de preferencia y pueden ocurrir igualmente como resultado de la mayor eficiencia en el uso del combustible de las aeronaves. Las estelas de condensación se producen por el vapor de agua emitido por las aeronaves y sus propiedades ópticas dependen de las partículas emitidas o formadas en el penacho de la aeronave y en las condiciones atmosféricas ambientales. El efecto radiante de las estelas de condensación

depende de sus propiedades ópticas y de la cobertura global, siendo ambos factores inciertos. Los satélites han permitido observar estelas de condensación como nubes en forma de línea sobre zonas de gran tránsito aéreo, cubriendo en promedio el 0,5% de la zona sobre Europa central en 1996 y 1997.

4.6 Nubes cirrus

Se ha observado un aumento de nubes cirrus después de la formación de persistentes estelas de condensación. Los aumentos de la cobertura de estas nubes (además de las estelas de condensación de forma lineal) coinciden de modo positivo con las emisiones de las aeronaves en un número limitado de estudios. Cerca del 30% de la tierra está cubierto de nubes cirrus. En promedio un aumento de la cobertura de nubes cirrus tiende a calentar la superficie de la Tierra. Una estimación de la

cobertura de nubes cirrus inducida por las aeronaves respecto al período final del decenio de 1990 indica que varía entre 0,0% y 0,2% de la superficie de la Tierra. Para el escenario Fa1 esto pueda posiblemente aumentar al cuádruple (0,0% a 0,8%) en 2050; no obstante, los mecanismos conexos de los aumentos de cobertura de cirrus no se entienden totalmente y exigen ulterior investigación.

4.7 Aerosoles de sulfato y hollín

Las concentraciones en masa de aerosoles de 1992 provocadas por las aeronaves son pequeñas en relación con las causadas por fuentes situadas en la superficie. Aun cuando la acumulación de aerosoles aumentará por el empleo de combustible de aviación, se prevé que en 2050 las concentraciones en masa de aerosoles causadas por las aeronaves sigan siendo pequeñas en comparación con las fuentes de superficie. El aumento del hollín tiende a calentar mientras que el de los sulfatos tiende a enfriar la superficie de la tierra. La fuerza radiante directa de los aerosoles de sulfatos y hollín de las aeronaves es pequeña comparada a las de las otras emisiones de las aeronaves. Debido a que los aerosoles influyen en la formación de nubes, la acumulación de aerosoles provocada por las aeronaves puede desempeñar un papel en el incremento de la formación de nubes y cambiar las propiedades radiantes de las nubes.

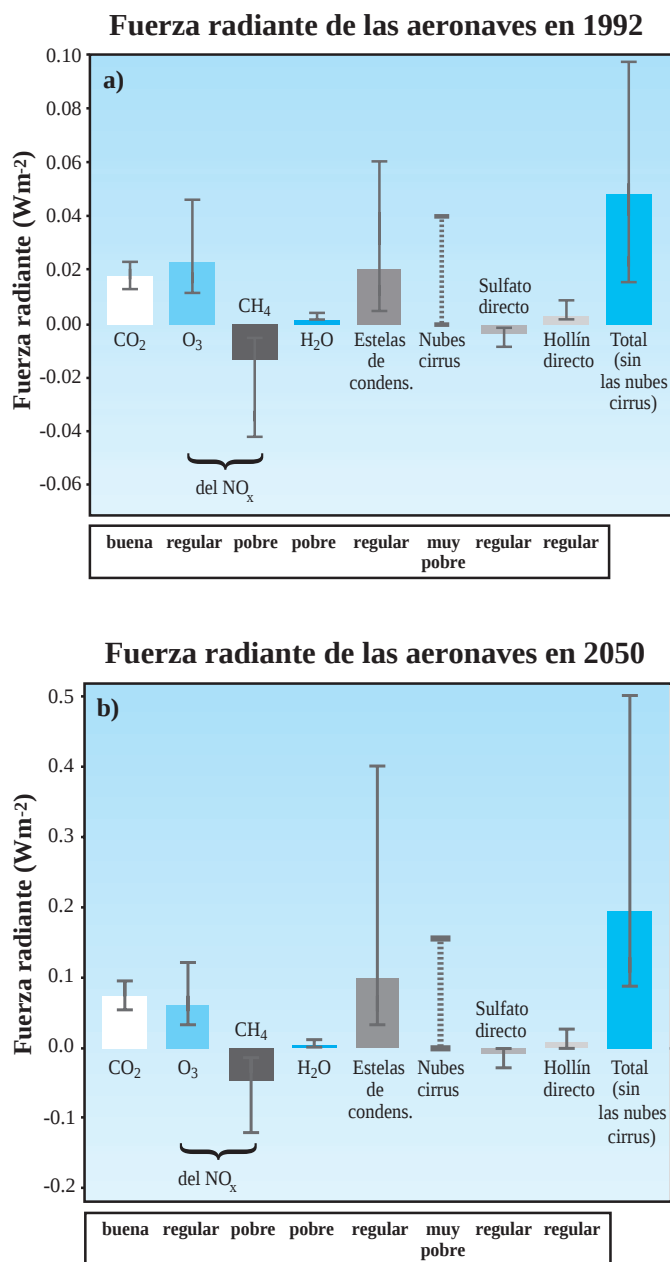


Figura 2: Estimaciones de la fuerza radiante promediada global y anualmente (Wm^{-2}) proveniente de las aeronaves subsónicas en 1992 (2a) en 2050 para el escenario Fa1 (2b). La escala de la Figura 2b es 4 veces mayor que la de la 2a. Las barras indican la mejor estimación de la fuerza radiante mientras que la línea correspondiente a cada barra es una gama de incertidumbre de dos tercios basada en los mejores conocimientos y dispositivos disponibles actualmente. (La gama de dos tercios de incertidumbre quiere decir que hay una probabilidad del 67% de los valores verdaderos se encuentren dentro de dicha gama). La información disponible sobre las nubes cirrus es insuficiente para determinar ya sea la mejor estimación, ya sea una gama de incertidumbre; la línea quebrada indica una gama de mejores estimaciones posibles. La estimación de la fuerza radiante total no incluye el efecto de los cambios de la nubosidad de cirrus. La estimación de incertidumbre para la fuerza radiante total (sin cirrus adicionales) se calcula como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de las gamas superior e inferior de los componentes individuales. Las evaluaciones bajo la gráfica (“buena”, “regular”, “pobre”, “muy pobre”) son una apreciación relativa correspondiente a cada componente e indican el nivel de comprensión científica. Se basan en la cuantía de la prueba disponible en apoyo de la mejor estimación y su incertidumbre, el grado de consenso en la literatura científica y el alcance del análisis. Esta evaluación es distinta de la de la gama de incertidumbre representada por las líneas correspondientes a cada barra. Este método de presentación es diferente y más significativa que el nivel de confianza presentado en las gráficas análogas del *Cambio climático 1995: la ciencia del cambio climático*.

4.8 ¿Cuáles son los efectos climáticos generales de las aeronaves subsónicas?

Los impactos climáticos de las diferentes emisiones antropógenas pueden compararse utilizando el concepto de fuerza radiante. La mejor evaluación de la fuerza radiante en 1992 causada por las aeronaves es de $0,05 \text{ Wm}^{-2}$, o sea aproximadamente el 3,5% de la fuerza total radiante proveniente de todas las actividades antropógenas. Para el escenario de referencia (Fa1), la fuerza radiante debida a las aeronaves en 2050 es de $0,19 \text{ Wm}^{-2}$ o sea, el 5% de la fuerza radiante en el escenario de gama media IS92 (3,8 veces el valor de 1992). Según la gama de escenarios que se consideran aquí, se prevé que la fuerza radiante crezca de $0,13 \text{ Wm}^{-2}$ a $0,56 \text{ Wm}^{-2}$ en 2050, lo cual representa un factor de 1 vez y media inferior a un factor de 3 veces mayor al de Fa1 y de 2,6 veces a 11 veces el valor de 1992. Estas estimaciones de la fuerza radiante combinan los efectos de los cambios de dióxido de carbono, ozono, metano, H_2O , estelas de condensación de forma lineal y aerosoles pero no incluyen los cambios posibles de las nubes cirrus.

Los valores globales promediados de la fuerza radiante de los diferentes componentes de 1992 y de 2050 según el escenario de referencia (Fa1) se presentan en la Figura 2. Ésta indica las mejores estimaciones de la fuerza radiante de cada componente y la gama de dos tercios de incertidumbre⁸. La obtención de estas gamas de incertidumbre entraña una determinación científica de experto y puede también comprender modelos estadísticos objetivos. La gama de incertidumbre en la fuerza radiante aquí indicada combina la incertidumbre al calcular el cambio atmosférico de los gases de efecto invernadero y los aerosoles con la del cálculo de la fuerza radiante. Por lo que atañe a nubes cirrus adicionales, se proporciona sólo una gama para la mejor estimación; esto no se incluye en la fuerza radiante total.

Para cada componente se evalúa el estado de la comprensión científica. Esto no es lo mismo que el nivel de confianza expresado en documentos anteriores del IPCC. Esta evaluación es distinta de la gama de incertidumbre y es una apreciación relativa de la comprensión científica correspondiente a cada componente. La evaluación se basa en la cuantía de la prueba disponible para apoyar la mejor estimación y su incertidumbre, el grado de consenso en la literatura científica y el alcance del análisis. La fuerza radiante total según cada uno de los seis escenarios para el crecimiento de la aviación se puede ver en la Figura 3 para el período 1990-2050.

La fuerza radiante total debida a la aviación (sin la fuerza radiante de la cantidad adicional de cirrus) probablemente se sitúe entre $0,01 \text{ Wm}^{-2}$ y $0,1 \text{ Wm}^{-2}$ en 1992, con los grados mayores de incertidumbre originándose en las estelas de condensación y el metano. De ahí que la fuerza radiante total pueda ser 2 veces más grande o 5 veces más pequeña que la mejor estimación. Para todo escenario de 2050, la gama de incertidumbre de la fuerza radiante es levemente mayor que

para 1992, pero las variaciones más grandes de la fuerza radiante proyectada provienen de la gama de escenarios.

En el período 1992 a 2050, la fuerza radiante general de las aeronaves (excluyendo la atribuible a los cambios en las nubes cirrus) para todos los escenarios de este informe es de 2 a 4 veces más grande que la del dióxido de carbono producido sólo por las aeronaves. La fuerza radiante general para la suma de todas las actividades humanas se estima que sea 1,5 veces mayor que la del dióxido de carbono solo.

Las emisiones de NO_x causan cambios en el metano y el ozono, estimándose que la influencia sobre la fuerza radiante sea de magnitud similar pero de signo opuesto. No obstante, como se observó anteriormente, la distribución geográfica de la fuerza radiante del ozono causada por las aeronaves es mucho más regional que la de la fuerza radiante del metano provocada por las aeronaves.

El efecto de las aeronaves sobre el clima se superpone al causado por otras emisiones antropógenas de los gases de efecto invernadero y partículas, y sobre la variabilidad natural ambiente. La fuerza radiante de la aviación es de un 3,5% de la fuerza radiante total de 1992. No ha sido posible separar la influencia del cambio del clima global causado por la aviación (o cualquier otro sector con una fuerza radiante análoga) de todas las demás actividades antropógenas. Las aeronaves contribuyen al cambio global aproximadamente en proporción a su contribución a la fuerza radiante.

4.9 ¿Cuáles son los efectos generales de las aeronaves subsónicas sobre la UV-B?

La capa de ozono, buena parte de la cual se encuentra en la estratósfera, actúa como un escudo contra la radiación solar ultravioleta (UV). La tasa de la dosis de eritema, que se define

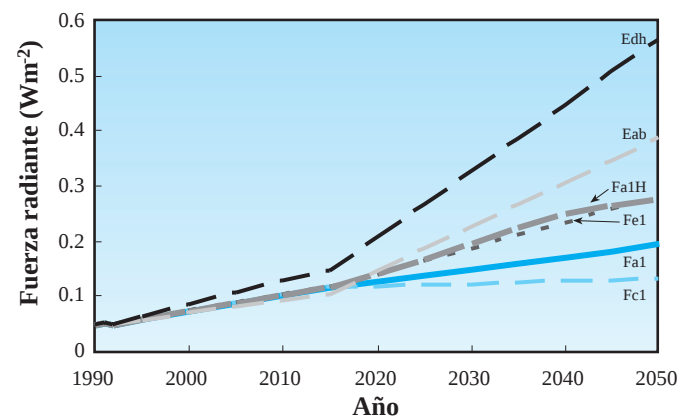


Figura 3: Estimaciones de la fuerza radiante total promediadas global y anualmente (sin nubes cirrus) correspondientes a las emisiones de la aviación en cada uno de los seis escenarios relativos al crecimiento de la aviación en el período 1990 a 2050. [Nota: no se ha trazado el Fa2 debido a que la diferencia con respecto al escenario Fa1 no sería discernible en la figura.]

⁸ La gama de dos tercios de incertidumbre significa que hay 67% de probabilidad de que los valores verdaderos se encuentren dentro de esta gama.

como la irradiación UV ponderada según el grado efectivo de insolación, se estima que ha disminuido por las aeronaves en 1992 en un 0,5% a 45°N en julio. Para fines de comparación, el aumento calculado en la tasa de dosis de eritema debida al agotamiento observado del ozono es de un 4% en el período de 1970 a 1992 a 45°N en julio⁹. El efecto neto de las aeronaves subsónicas parece ser un aumento en el ozono en columna y una disminución en la radiación UV, que se debe principalmente a las emisiones de NO_x de las aeronaves. Los cambios mucho más pequeños de la radiación UV están relacionados con las estelas de condensación de las aeronaves, los aerosoles y la nubosidad inducida. En el hemisferio sur, los efectos calculados de la emisión de las aeronaves sobre la tasa de dosis de eritema son cuatro veces más bajos que en el hemisferio norte.

Para el escenario de referencia (Fa1), el cambio en la tasa de la dosis de eritema at 45°N en julio de 2050 en comparación con una simulación sin aeronaves es de -1,3% (con una gama de dos tercios de incertidumbre de -0,7% a -2,6%). Para fines de comparación, el cambio calculado en la tasa de la dosis de eritema debido a los cambios de las concentraciones de trazas, distintas a las de las aeronaves, entre 1970 y 2050 a 45°N es de -3%, disminución que es resultado neto de dos efectos que se oponen: 1) la recuperación incompleta del ozono estratosférico a los niveles de 1970 debido a la persistencia de los compuestos que contienen halógenos y son de larga vida, y 2) el aumento de las proyecciones de emisiones en superficie de contaminantes de corta vida que producen ozono en la troposfera.

5. ¿Cuáles son los impactos actuales y futuros de la aviación supersónica sobre la fuerza radiante y la radiación UV?

Una posibilidad para el futuro es la creación de una flota de aeronaves de transporte civil de alta velocidad (HSCT), supersónicas de segunda generación, aunque hay considerable incertidumbre en cuanto a que pueda crearse tal flota. Se prevé que estas aeronaves supersónicas volarán en crucero a una altitud de 19 km, o sea unos 8 km más elevada que las subsónicas y emitirán dióxido de carbono, vapor de agua, NO_x , SO_x y hollín en la estratósfera. Los NO_x , el vapor de agua y los SO_x de las emisiones de las aeronaves supersónicas contribuyen todos a los cambios en el ozono estratosférico. Se estima que la fuerza radiante de las aeronaves supersónicas será 5 veces mayor que la de las aeronaves subsónicas desplazadas en el escenario Fa1. La fuerza radiante calculada de las aeronaves supersónicas depende del tratamiento del vapor de agua y del ozono en los modelos. Este efecto es difícil de simular en los modelos actuales y por lo tanto es sumamente incierto.

El escenario Fa1 considera la adición de una flota de aeronaves supersónicas civiles que se suponía que comenzaría sus

operaciones en el año 2015 y aumentaría a un máximo de 1.000 aeronaves por el año 2040. A título de referencia, la flota subsónica civil al finalizar 1997 constaba aproximadamente de 12.000 aeronaves. En este escenario, las aeronaves están diseñadas para volar en crucero a Mach 2,4 y se presumen nuevas tecnologías que mantienen emisiones de 5 g de NO_2 por kg de combustible (menos que las aeronaves supersónicas civiles actuales que tienen emisiones de 22 g de NO_2 por kg de combustible). Se presume que estas aeronaves supersónicas reemplazarán una parte de la flota subsónica (11%, en términos de las emisiones del escenario Fa1). Las aeronaves supersónicas consumen más del doble de combustible por pasajero-km que las subsónicas. Para el año 2050, se estima que la flota combinada (escenario Fa1H) añadiría otros 0,08 Wm^{-2} (42%) a la fuerza radiante de 0,19 Wm^{-2} del escenario Fa1 (véase la Figura 4). La mayor parte de esta fuerza radiante adicional se debe a la acumulación de vapor de agua estratosférico.

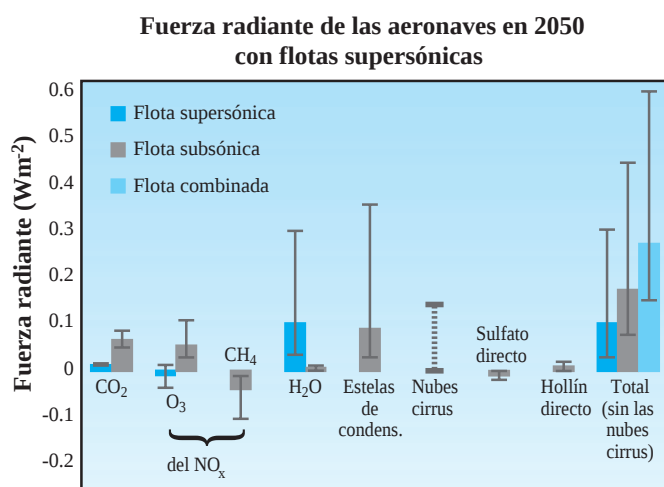


Figura 4: Estimaciones de la fuerza radiante promediada global y anualmente de una flota combinada de aeronaves subsónicas y supersónicas (en Wm^{-2}) debido a cambios en los gases de efectos invernadero, aerosoles y estelas de condensación en 2050 para el escenario Fa1H. En este escenario, se supone que las aeronaves supersónicas reemplazan parte de la flota subsónica (11%, en términos de emisiones del escenario Fa1). Las barras indican la mejor estimación de la fuerza radiante mientras que la línea correspondiente a cada barra es una gama de incertidumbre de dos tercios basada en los mejores conocimientos y dispositivos disponibles actualmente. (La gama de dos tercios de incertidumbre quiere decir que hay una probabilidad del 67% de los valores verdaderos se encuentren dentro de dicha gama). La información disponible sobre las nubes cirrus es insuficiente para determinar ya sea la mejor estimación, ya sea una gama de incertidumbre; la línea quebrada indica una gama de mejores estimaciones posibles. La estimación de la fuerza radiante total no incluye el efecto de los cambios de la nubosidad de cirrus. La estimación de la incertidumbre de la fuerza radiante total (sin cirrus adicionales) se calcula como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de las gamas superior e inferior de los componentes individuales. El nivel de comprensión científica de los componentes supersónicos es como sigue: dióxido de carbono, “bueno”; ozono, “pobre”; y vapor de agua, “pobre”.

⁹ Este valor está basado en observaciones satelitales y cálculos modelizados. Véase: *Evaluación científica de la destrucción del ozono: 1998*. Informe N° 44, Proyecto mundial de investigación y vigilancia del ozono, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 732 págs.

Un efecto de introducir una flota supersónica civil para formar la flota combinada (Fa1H) es que también se reduce el ozono estratosférico y se aumenta la tasa de la dosis de eritema. El efecto máximo calculado es a 45°N cuando, en julio, el cambio de la columna de ozono en 2050 con respecto a la flota combinada subsónica y supersónica con respecto a un entorno sin aeronaves es de -0,4%. El efecto en la columna de ozono del solo componente supersónico es de -1,3% mientras que el del componente subsónico es de +0,9%.

La flota combinada cambiaría la tasa de la dosis de eritema a 45°N en julio en +0,3% en comparación con la atmósfera de 2050 sin aeronaves. La gama de dos tercios de incertidumbre para la flota combinada es de -1,7% a +3,3%. Compárese esto con el cambio previsto de -1,3% en Fa1. El vuelo a altitudes más elevadas da lugar a disminuciones mayores de la columna de ozono, mientras que volando más bajo se logran menores disminuciones de la columna de ozono y se puede incluso dar lugar a un aumento de la columna de ozono para el vuelo en la capa más baja de estratósfera. Además, las emisiones de las aeronaves supersónicas en la estratósfera del hemisferio norte pueden desplazarse al hemisferio sur donde pueden provocar agotamiento del ozono.

6. ¿Cuáles son las opciones para reducir las emisiones y los impactos?

Existe una serie de opciones para reducir el impacto de las emisiones de la aviación, lo cual incluye cambios en la tecnología de las aeronaves y los motores, el combustible y los métodos operativos, así como las medidas normativas y económicas. Las mismas podrían implantarse ya sea separadamente, ya sea en forma combinada por el sector público y/o el privado. Considerables adelantos en las aeronaves y en la tecnología de los motores y los mejoramientos de la gestión del tránsito aéreo descritos en este informe ya están incorporados en los escenarios de emisiones de las aeronaves empleados para el cálculo de los cambios climáticos. En los escenarios no se presumieron otras medidas operativas, que tienen potencial para reducir las emisiones ni se tuvieron en cuenta combustibles de alternativa. Nuevos adelantos tecnológicos ofrecen la posibilidad de proporcionar reducciones adicionales del consumo de combustible y de las emisiones. En la práctica, se prevé que algunas de las mejoras ocurran por razones comerciales. La oportunidad y el alcance de las opciones normativas, económicas y otras pueden influir potencialmente en la introducción de mejoras y en la demanda de los servicios de transporte aéreo. No se han considerado totalmente las opciones para mitigar los efectos del vapor de agua ni de la nubosidad.

La seguridad de las operaciones, el desempeño operativo y ambiental y el costo constituyen consideraciones dominantes para la industria de la aviación al evaluar toda nueva compra de aeronaves o cambios potenciales de la ingeniería o de los aspectos operacionales. La vida útil de una aeronave es de 25 a 35 años. Estos factores tienen que tenerse en cuenta al evaluar

el ritmo al cual los adelantos tecnológicos y las opciones de políticas relacionadas con la tecnología pueden reducir las emisiones de la aviación.

6.1 Opciones de la tecnología de las aeronaves y de los motores

Los adelantos tecnológicos han reducido considerablemente la mayoría de las emisiones por pasajero-km. No obstante, hay potencial para mayores mejoras. Todo cambio tecnológico puede entrañar un equilibrio entre diversos impactos ambientales.

Las aeronaves subsónicas que se producen actualmente son un 70% más eficientes en el uso del combustible por pasajero-km que hace 40 años. Buena parte de este avance se ha logrado mediante mejoras de los motores y el resto del mejor diseño de las células. Se prevé para el año 2015 una mejora del 20% en la eficiencia en el consumo de combustible y de 40% a 50% para el 2050 en comparación con las aeronaves producidas actualmente. Los escenarios para 2050 elaborados para este informe ya incorporan estas ganancias adicionales en la eficiencia del combustible al estimar el uso del combustible y las emisiones. Las mejoras en la eficiencia de los motores reducen el consumo específico de combustible y la mayoría de los tipos de emisiones; pero las estelas de condensación pueden aumentar y, sin adelantos en la tecnología del combustible, las emisiones de NO_x también pueden aumentar.

El diseño de los futuros motores y células entraña un complejo proceso de toma de decisiones y un equilibrio de consideraciones entre muchos factores (p.ej., las emisiones de dióxido de carbono, las de NO_x a nivel del suelo, las de NO_x en altitud, las de vapor de agua, la producción de estelas de condensación/cirrus y el ruido). Estos aspectos no han sido caracterizados o cuantificados adecuadamente en el presente informe.

A nivel internacional, hay en marcha programas de investigación considerables, con el objetivo de reducir las emisiones de NO_x del ciclo de aterrizaje y despegue (LTO) en hasta un 70% con respecto a las normas reglamentarias actuales, mejorando también al mismo tiempo el consumo de combustible de los motores en un 8% a 10% por el año 2010. También se lograría la reducción de emisiones de NO_x a altitudes de crucero aunque no necesariamente en la misma proporción que para el LTO. Presumiendo que se puedan alcanzar los objetivos, la transferencia de esta tecnología a un número importante de las aeronaves nuevas que se produzcan exigirá un lapso mayor, por lo general un decenio. Los programas de investigación relacionados con las emisiones de NO_x de las aeronaves supersónicas también están en marcha.

6.2 Opciones en materia de combustible

Parecería que no hay ninguna alternativa práctica para los combustibles a base de queroseno para las aeronaves de

reacción comerciales en los próximos decenios. La reducción del contenido de sulfuro del queroseno permitirá disminuir las emisiones de SO_x y la formación de partículas de sulfato.

Las aeronaves de reacción necesitan combustible de alta densidad energética, especialmente para los vuelos de larga distancia. Otras opciones en materia de combustibles, como el hidrógeno, parecen viables a largo plazo pero exigirían nuevos diseños de aeronaves así como una nueva infraestructura para el abastecimiento. El combustible a base de hidrógeno eliminaría las emisiones de dióxido de carbono de las aeronaves pero aumentaría las de vapor de agua. No se han determinado los impactos ambientales generales ni la durabilidad ambiental de la producción y el uso del combustible a base de hidrógeno o de otros combustibles de alternativa.

La formación de partículas de sulfato a partir de las emisiones de las aeronaves, que depende de los motores y de los penachos, se reduce a medida que disminuye el contenido de sulfuro del combustible. Si bien existe la tecnología para eliminar virtualmente todo el sulfuro del combustible su eliminación da por resultado la disminución de la lubricidad.

6.3 Opciones operacionales

Las mejoras en la gestión del tránsito aéreo (ATM) y en otros procedimientos operacionales podrían reducir el consumo del combustible de aviación entre un 8% y un 18%. La gran mayoría de estas reducciones (6% a 12%) proviene de las mejoras de la ATM que se espera estará totalmente implementada en los próximos 20 años. Todas las emisiones de los motores se reducirán como consecuencia de esto. En todos los escenarios de emisiones de la aviación considerados en este informe ya se han tomado en cuenta las reducciones que aporta la ATM. El ritmo de introducción de la ATM mejorada dependerá de la implantación de acuerdos institucionales esenciales a nivel internacional.

Los sistemas de gestión del tránsito aéreo se utilizan para la guía, separación, coordinación y control de los movimientos de las aeronaves. Los sistemas de tránsito aéreo nacionales e internacionales existentes tienen limitaciones que resultan, por ejemplo, en esperas (aeronaves que vuelan en un circuito fijo esperando la autorización para aterrizar), rutas ineficientes y perfiles de vuelo menos que óptimos. Estas limitaciones resultan en un consumo excesivo de combustible y, por consiguiente, en emisiones excesivas.

Para la flota de aeronaves y operaciones actuales, la resolución de las limitaciones en los sistemas de gestión del tránsito aéreo podrían reducir el combustible consumido entre un 6% y un 12%. Se prevé que la mejora necesaria para estas reducciones de consumo del combustible estará totalmente implantada en los próximos 20 años, a reserva de que se hayan efectuado a tiempo los arreglos institucionales y reglamentarios necesarios. Al estimar el uso de combustible, los escenarios elaborados en este informe presumen una puesta en práctica oportuna de estas mejoras de la ATM.

Otras medidas operacionales para reducir la cantidad de combustible consumido por pasajero-km comprenden factores de ocupación mayores (transporte de más pasajeros o carga en una aeronave dada), la eliminación del peso no esencial, la optimización de la velocidad de las aeronaves, la limitación del empleo de energía auxiliar (p.ej., para calefacción, ventilación) y la reducción del rodaje. Las mejoras potenciales de estas medidas operacionales podrían reducir el combustible consumido y las emisiones, entre un 2% y un 6%.

Una mejor eficiencia operacional podría dar por resultado que aumente el tránsito aéreo, pero no se ha identificado ningún estudio que aporte pruebas sobre la existencia de dicho efecto.

6.4 Opciones normativas, económicas y otras

Aunque las mejoras en la tecnología de las aeronaves y motores y en la eficiencia del sistema de tránsito aéreo aportará beneficios ambientales, éstos no compensarán totalmente los efectos de las mayores emisiones resultantes del crecimiento previsto de la aviación. Las opciones basadas en políticas para reducir más las emisiones incluyen reglamentos más severos para las emisiones de los motores de las aeronaves, la eliminación de subsidios e incentivos que tienen consecuencias negativas para el medio ambiente, opciones basadas en el mercado como gravámenes ambientales (derechos e impuestos) y el intercambio del derecho de emisiones y acuerdos de medidas voluntarias, programas de investigación y la sustitución de la aviación por el transporte ferroviario o en ómnibus. La mayoría de estas opciones darían a más elevados costos y tarifas de las líneas aéreas. Algunas de estas soluciones no se han investigado ni comprobado totalmente en la aviación y sus resultados son inciertos.

La homologación de las emisiones de los motores constituye un medio para reducir determinadas emisiones. Las autoridades aeronáuticas emplean actualmente dicho enfoque para reglamentar las emisiones de dióxido de carbono, los hidrocarburos, los NO_x y el humo. La Organización de Aviación Civil Internacional ha comenzado a trabajar en la evaluación de la necesidad de normas para las emisiones de las aeronaves a la altitud de crucero a fin de complementar las normas LTO existentes para las emisiones de NO_x y otras.

Las opciones basadas en el mercado, como los gravámenes ambientales (derechos e impuestos) y el intercambio del derecho de emisiones, tienen el potencial de alentar la innovación tecnológica y mejorar la eficiencia y pueden reducir la demanda de viajes aéreos. Muchas de estas soluciones no han sido investigadas ni ensayadas plenamente en la aviación y sus resultados son inciertos.

Los gravámenes ambientales (derechos e impuestos) pueden constituir un medio de reducir el aumento de las emisiones de las aeronaves al estimular más el desarrollo y la utilización de aeronaves más eficientes y al reducir el aumento de la demanda por servicios de transporte aéreo. Los estudios demuestran

que para ser eficaces en el plano ambiental, los gravámenes tendrían que considerarse dentro de un marco internacional.

Otra solución que podría tomarse en cuenta para mitigar el efecto de las emisiones de la aviación es el intercambio del derecho de emisiones, un enfoque basado en el mercado que permite a los participantes minimizar de manera cooperativa los costos de la reducción de emisiones. El intercambio del derecho de emisiones no ha sido ensayado en la aviación aunque se ha utilizado para el dióxido de sulfuro (SO₂) en los Estados Unidos de América y es posible para las sustancias agotadoras del ozono del Protocolo de Montreal. Este enfoque es una de las disposiciones del Protocolo de Kyoto que se aplica a las Partes del Anexo B.

También se están explorando actualmente los acuerdos de medidas voluntarias como medio de lograr reducciones en las emisiones del sector aeronáutico. Tales acuerdos se han empleado en otros sectores para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero o estimular las disminuciones aceleradas.

Otras medidas que se pueden considerar son la eliminación de subsidios o incentivos que tendrían consecuencias negativas desde el punto de vista ambiental y los programas de investigación.

La sustitución por el transporte ferroviario o en ómnibus podría dar por resultado la reducción de las emisiones de dióxido de carbono por pasajero-km. El objeto de este tipo de reducción se limita a rutas de alta densidad y de corta distancia que podría contar con enlaces por ómnibus o ferroviarios. Las estimaciones indican que hasta el 10% de los viajeros en Europa podrían ser transferidos de las aeronaves a trenes de alta velocidad. Es necesario un análisis ulterior, que incluya los aspectos recíprocos entre una amplia gama de efectos ambientales (p.ej., exposición al ruido, calidad del aire local y efectos atmosféricos globales), a fin de explorar el potencial de sustitución.

7. Problemas futuros

En este informe se han evaluado los cambios potenciales climáticos y del ozono debidos a las aeronaves hasta el año 2050 con arreglo a diferentes escenarios. Se reconoce que los efectos de algunos tipos de emisiones de las aeronaves se comprenden bien. También se revela que no es así para los efectos de otros tipos, debido a las numerosas incertidumbres en el plano científico. Ha habido un constante mejoramiento en la caracterización de los impactos potenciales de las actividades humanas, incluidos los efectos de la aviación sobre la atmósfera

global. Se han examinado también en el informe los adelantos tecnológicos, las mejoras de las infraestructuras y las medidas normativas o basadas en el mercado para reducir las emisiones de la aviación. Hace falta una mayor labor para reducir las incertidumbres científicas y otras, entender mejor las opciones para la reducción de las emisiones, informar mejor a los encargados de tomar las decisiones y mejorar la comprensión de los problemas socioeconómicos relacionados con la demanda de servicios de transporte aéreo.

Hay varias áreas clave de incertidumbre científica que limitan nuestra capacidad de prever los impactos de la aviación sobre el clima y el ozono:

- la influencia de las estelas de condensación y de los aerosoles sobre las nubes cirrus
- el papel de los NO_x en el cambio de las concentraciones de ozono y de metano
- la capacidad de los aerosoles de alterar los procesos químicos
- el desplazamiento de los gases atmosféricos y partículas en la troposfera superior/estratósfera inferior
- la reacción climática a las fuerzas radiantes regionales y las perturbaciones estratosféricas.

Existen varias cuestiones socioeconómicas y tecnológicas que necesitan una mayor definición, lo cual incluye, entre otras cosas, las siguientes:

- caracterización de la demanda de servicios de aviación comercial, incluidas las limitaciones de las infraestructuras aeroportuarias y de aerovías y el cambio tecnológico conexo
- métodos para evaluar los costos externos y los beneficios ambientales de las opciones normativas y de las basadas en el mercado
- evaluación de los efectos macroeconómicos de las reducciones de las emisiones en la industria de la aviación que podrían resultar de las medidas de mitigación
- capacidades tecnológicas y métodos operacionales para reducir las emisiones que dan lugar a la formación de estelas de condensación y una nubosidad acrecentada
- La comprensión de los efectos económicos y ambientales al satisfacer escenarios potenciales de estabilización (para las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero), incluso medidas para reducir las emisiones de la aviación y también cuestiones tales como los impactos ambientales relativos a los diferentes modos de transporte.

LISTA DE PUBLICACIONES DEL IPCC

I. PRIMER INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC (1990)

- a) **CAMBIO CLIMÁTICO — Evaluación científica del IPCC.** Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre la Evaluación Científica del IPCC (*también en chino, francés, inglés y ruso*)
- b) **CAMBIO CLIMÁTICO — Evaluación de los impactos del IPCC.** Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre Evaluación de los impactos (*también en chino, francés, inglés y ruso*).
- c) **CAMBIO CLIMÁTICO — Estrategias de respuesta del IPCC.** Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre Estrategias de Respuesta del IPCC (*también en chino, francés, inglés y ruso*).
- d) **Resúmenes para responsables de políticas, 1990.**

Escenarios de la emisiones (preparado por el Grupo de trabajo sobre Estrategias de Respuesta del IPCC), 1990.

Evaluación de la vulnerabilidad de las zonas costeras a la elevación del nivel del mar — metodología común, 1991.

II. SUPLEMENTO DEL IPCC (1992)

- a) **CAMBIO CLIMÁTICO 1992 — Informe suplementario a la evaluación científica del IPCC.** Informe de 1992 del Grupo de trabajo sobre Evaluación Científica del IPCC.
- b) **CAMBIO CLIMÁTICO 1992 — Informe suplementario a la evaluación de los impactos del IPCC.** Informe de 1992 del Grupo de trabajo sobre Evaluación de los impactos del IPCC.

CAMBIO CLIMÁTICO: evaluaciones de 1990 y 1992 del IPCC — Primer informe de evaluación del IPCC – Resumen general y resúmenes para responsables de políticas y suplemento del IPCC de 1992 (*también en chino, francés, inglés y ruso*).

El cambio climático global y el creciente desafío del mar. Subgrupo de trabajo sobre gestión de las zonas costeras del Grupo de trabajo sobre Estrategias de Respuesta del IPCC, 1992.

Informe del Cursillo de Estudios Nacionales del IPCC, 1992.

Directrices preliminares para evaluar los impactos del cambio climático, 1992.

III. INFORME ESPECIAL DEL IPCC, 1994

CAMBIO CLIMÁTICO 1994 — Forzamiento radiativo del cambio climático y evaluación de los escenarios de emisiones IS92 del IPCC.

IV. SEGUNDO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC (1995)

- a) **CAMBIO CLIMÁTICO 1995 — La ciencia del cambio climático** (incluido el Resumen para responsables de políticas). Informe del Grupo de trabajo I del IPCC, 1995.
- b) **CAMBIO CLIMÁTICO 1995 — Análisis científicos y técnicos de impactos, adaptaciones y mitigación del cambio climático.** (incluido el Resumen para responsables de políticas). Informe del Grupo de trabajo II del IPCC, 1995.

- c) **CAMBIO CLIMÁTICO 1995 — Las dimensiones económicas y sociales del cambio climático.** (incluido el Resumen para responsables de políticas). Informe del Grupo de trabajo III del IPCC, 1995.
- d) **Síntesis del Segundo informe de evaluación del IPCC sobre la información científica y técnica pertinente para interpretar el artículo 2 de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, de las Naciones Unidas, 1995.**

(Nota: la síntesis del IPCC y los tres resúmenes para responsables de políticas se han publicado en un solo volumen y existen también en árabe, chino, francés, inglés y ruso.)

V. METODOLOGÍAS DEL IPCC

- a) **Directrices de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero** (3 volúmenes), 1994 (*también en chino, francés, inglés y ruso*).
- b) **Directrices técnicas del IPCC para evaluar los impactos del cambio climático y las estrategias de adaptación, 1994** (*también en árabe, chino, francés, inglés y ruso*).
- c) **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories** (3 volúmenes), 1996.

VI. DOCUMENTOS TÉCNICOS DEL IPCC

TECNOLOGÍAS, POLÍTICAS Y MEDIDAS PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO — Documento Técnico I del IPCC (*también en francés e inglés*).

INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS CLIMÁTICOS SIMPLES UTILIZADOS EN EL SEGUNDO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC — Documento Técnico II del IPCC (*también en francés e inglés*).

ESTABILIZACIÓN DE LOS GASES ATMOSFÉRICOS DE EFECTO INVERNADERO: IMPLICACIONES FÍSICAS, BIOLÓGICAS Y SOCIOECONÓMICAS — Documento Técnico III del IPCC (*también en francés e inglés*).

IMPLICACIONES DE LAS PROPUESTAS DE LIMITACIÓN DE EMISIONES DE CO₂ — Documento Técnico 4 del IPCC (*también en francés e inglés*).

VII. INFORME ESPECIAL DEL IPCC, 1997

IMPACTOS REGIONALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD. (Incluido en resumen para responsables de políticas) (*también en árabe, chino, francés, inglés y ruso*). Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC, 1997

VIII. INFORME ESPECIAL DEL IPCC, 1999

LA AVIACIÓN Y LA ATMÓSFERA GLOBAL (Incluido en resumen para responsables de políticas) (*también en árabe, chino, francés, inglés y ruso*)
Informe especial de los Grupos de trabajo I y III del IPCC, 1999.