

Análisis comparativo de las emisiones en vuelo por las operaciones aerocomerciales de la region SAM

Juan Ignacio D'Iorio, Matías Julián Coppa, Nahuel Tomassini, Alejandro di Bernardi

UIDET GTA, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

juanignacio.diorio@ing.unlp.edu.ar, Matias.coppa@ing.unlp.edu.ar,
tomassininahuel@gmail.com, cadibern@ing.unlp.edu.ar

Abstract

El objetivo del presente trabajo es la caracterización de los gases emitidos durante la etapa crucero de los vuelos aerocomerciales en la región OACI SAM. A partir de las estadísticas de pasajeros transportados por operador aéreo, publicadas por la Comisión Latinoamericana de Aviación Civil (CLAC), y de la caracterización de la flota y planta poder de cada operador aéreo, se obtienen las operaciones realizadas por cada aerolínea entre los aeropuertos de los países de la región.

Utilizando los índices de emisiones de aeronaves en vuelo crucero (European Environment Agency, 2013) se cuantifican las concentraciones de hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO) de todas las operaciones realizadas en el año 2013. Utilizando los mapas del servidor ICAO Gis, se presenta la proyección de las emisiones, de acuerdo al nivel de concentración, en las principales rutas aéreas de la región citada, así como un análisis del tiempo de vida de dichos contaminantes en las distintas alturas de vuelo.

Como restricción a este trabajo, cabe mencionar que no se analiza el aporte de los vuelos nacionales ni de aquellos vuelos a países fuera de la región, es decir, se limita el análisis a los vuelos realizados entre países de la región.

El estudio efectuado se encuentra encolumnado con los objetivos del comité de protección ambiental aeronáutica (CAEP) conformado por la Organización de aviación civil internacional (OACI), particularmente con los del Grupo de Trabajo 3 (WG3 - *Emissions*).

Palabras clave: emisiones, gaseosas, crucero, SAM, transporte.

1. Introducción

Teniendo en cuenta el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra y el balance energético de la misma con la atmósfera, el impacto ambiental debido al transporte aéreo puede medirse mediante el forzamiento radiativo (RF), el cual representa aproximadamente el 3,5% del total antropogénico mundial. Dicho parámetro ha sido estudiado por primera vez para un sector específico por la IPCC en el año 1999 (Penner, 1999), y luego proyectado bajo distintos escenarios (Fuglestedt et al., 2010). Teniendo en cuenta la formación de estelas el RF de la actividad aérea representa el 4,9% del forzamiento radiativo y para el año 2050 se prevé que su crecimiento sea de 3,5 a 4,7% (Wuebbles, Gupta & Ko, 2007).

Bajo distintos escenarios temporales, se han realizado estudios y modelos que cuantifican los distintos gases en la etapa crucero, tanto para la aviación comercial como para la militar y general (Baughcum, Henderson, Hertel & Maggiora; Henderson, Wickrama, Baughcum, Begin, Franco, Greene et al., 1999; Baughcum, 1997; Lee, BSM Engineering, 2005; Kim, Jonson, Fleming, Balasubramanian, Malwitz, Lee & Gillette, 2005; Tarrason, Jonson, Berntsen & Rypdal, 2002), en las distintas regiones del mundo. Aun así ponderar el impacto ambiental producto de las emisiones en las distintas altitudes representa una gran complejidad. Debido al tiempo de residencia de los gases, la concentración, el tiempo de vida aproximado en la atmósfera y, por sobre todo, las reacciones químicas producto de la mezcla en las distintas condiciones ambientales, los efectos que producen en el clima sólo pueden ser medidos y comparados mediante el concepto de forzamiento radiativo (RF).

De acuerdo a la altitud, se muestran a continuación las emisiones mundiales de la aviación, producidas en el año 2000 (Kim et al., 2005):

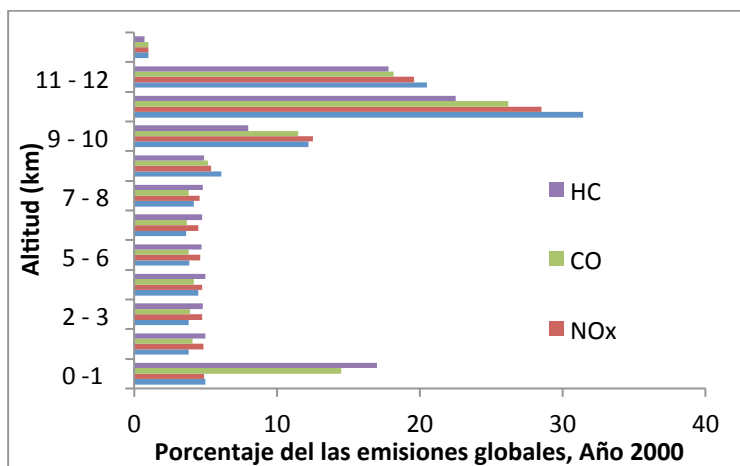
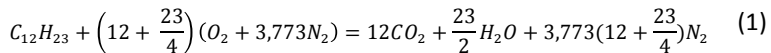


Figura 1. Porcentaje de las emisiones globales de acuerdo a las distintas altitudes (Kim et al., 2005)

Por otro lado, del análisis de emisiones de CO₂ debido a la actividad comercial en las distintas latitudes y longitudes, se observa que el 92% del combustible es consumido en el hemisferio norte y el 67% entre los paralelos 30 y 60 N (Simone, Stettler & Barrett, 2013). A su vez, los patrones de viento típicos en las latitudes medias superiores tienden a concentrar estas emisiones sobre el Ártico y a desplazar las emisiones de latitudes medias hacia la misma región, siendo ésta una de las más afectadas debido al transporte aéreo (Wilkerson, Jacobson & Malwitz, 2010; Brasseur, Cox, Hauglustaine, Isaksen, Lelieveld, Lister et al., 1998).

2. Desarrollo

La ecuación que representa una combustión completa del combustible aeronáutico de composición molecular promedio C₁₂H₂₃ es (Heywood, 1998):



Ecuación 1. Descripción

Las cantidades totales de gases emitidos dependerán de ciertos factores tales como el tipo de combustible utilizado, la riqueza de la mezcla, el mantenimiento de la cámara de combustión o del motor en general, las condiciones atmosféricas de operación, la etapa de vuelo analizada, entre otros. Por ejemplo, debido a la edad de motor, el compresor de alta presión y la turbina de alta presión son los que mayor efecto tienen en las emisiones de NO_x (Lukachko & Waitz, 1996).

Los principales gases que aportan a un forzamiento radiativo positivo son el dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el vapor de agua (Penner, 1999).

El efecto ambiental de los NO_x como gases sin combinar es un forzamiento radiativo positivo, pero distintos estudios sobre su combinación con otros (O₃ and CH₄) muestran como el efecto puede ser negativo, variando siempre su impacto debido a la altura bajo análisis (Wild, Prather & Akimoto, 2001). Se han desarrollado modelos de impacto ambiental, en distintos niveles de la atmósfera y su relación con la actividad aeronáutica (Stevenson, Doherty, Sanderson, Collins, Johnson & Derwent, 2004; Köhler, Rädcl, Dessens, Shine, Rogers, Wild & Pyle, 2008) específicamente debido a los NO_x.

Debido a la reacción química de la Ecuación 1, el factor de emisión de H₂O es proporcional al combustible quemado, aproximadamente $1,240 \frac{\text{g de H}_2\text{O}}{\text{kg de combustible}}$ (Van Ness, 1996). Junto con las emisiones de hollín y material particulado, el vapor de agua promueve la formación de estelas (*contrails*), las cuales a su vez promueven la formación de cirrus. Tanto las

estelas como los cirrus poseen un efecto positivo en el forzamiento radiativo, pero debido a sus condiciones ópticas y ambientales, la cuantificación de este valor es compleja de hallar; su formación producto de la actividad del transporte aéreo ha sido cuantificada bajo distintos escenarios y analizada para las distintas regiones del mundo (Sausen, Gierens, Ponater & Schumann, 1998; Lee, Fahey, Forster, Newton, Wit, Lim, Owen & Sausen, 2009, Gierens, Sausen & Schumann, 1999).

Aún si la eficiencia del combustible aumenta en los próximos años, debido al crecimiento esperado del tráfico aéreo, se prevé un incremento de la superficie ocupada por las estelas. Se estima que para fines del 2015 la superficie ocupada por las estelas producidas por la actividad aeronáutica puede alcanzar el 0,25% y un 0,75% al año 2050 (Gierens, Sausen & Schumann, 1999).

Si bien se han desarrollado modelos del impacto ambiental en distintos niveles de la atmósfera, el efecto de las emisiones de CO y HC en el forzamiento radiativo antropogénico es relativamente pequeño (Penner, Lister, Griggs, Dokken & McFarland, 1999). Dado que el 90% de las emisiones totales ocurren fuera del Ciclo *Landing Take-Off*, para la determinación del efecto en el RF, en el presente estudio nos limitaremos a analizar las emisiones de Dióxido de Carbono, Óxidos de nitrógeno y Vapor de agua.

2.1 Metodología

Se muestra a continuación el proceso metodológico aplicado para la obtención de los gases contaminantes en las principales rutas aéreas de la región SAM:



Figura 2. Proceso metodológico aplicado

En primer lugar, para el cálculo de las distancias reales de vuelo por cada ruta aérea se analizaron las mismas mediante la ayuda del servidor de información geográfica de OACI: ICAO gv Sig. Se presenta a continuación una imagen ilustrativa de las rutas en Sudamérica:

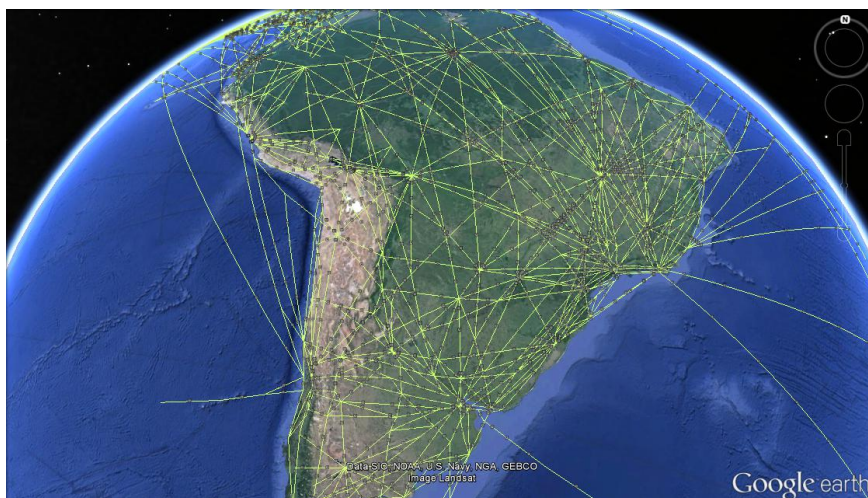


Figura 3. Rutas aéreas de la Región SAM, ICAO gv Sig, 2015

Una vez determinada la ruta, se utilizó una base de datos online de cartas aeronáuticas (www.skyvector.com) para la determinación de la distancia de vuelo real.

Luego, a partir de los datos brindados por la Comisión Latinoamericana de Aviación Civil (CLAC), se estudió la flota operativa de cada uno de los operadores aéreos para la determinación de la aeronave tipo con la cual realiza una ruta específica. Para casos de aerolíneas en que su flota se encontraban dos modelos de aeronaves predominantes, como es el caso de GOL Transporte Aéreos que posee 98 Boeing 737-800 y 35 Boeing 737- 700, se asignó de forma proporcional la cantidad de operaciones a dicha clasificación de aeronaves.

Para el cálculo de la cantidad de operaciones se realizó el producto de los pasajeros transportados por la capacidad máxima de cada aeronave; cabe destacar que para ello se analizó la capacidad máxima específica de cada aeronave de cada operador aéreo. Utilizando un factor de ocupación promedio de 0,77%, se obtuvieron la cantidad de operaciones reales al año 2013.

Por último, una vez obtenida la distancia real de vuelo y la aeronave específica, se obtuvo el consumo de combustible, y utilizando los índices de emisiones de aeronaves en vuelo crucero (European Environment Agency, 2013) se cuantificaron las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O).

Dado que los datos brindados por Venezuela no cumplen con los requisitos exigidos por la CLAC para la presentación de estadísticas, donde no se especifica el operador aéreo, se tomó como hipótesis que dichas operaciones fueron realizadas por la aerolínea Conviasa.

2.2 Características de la región

Aproximadamente el 8% de las aeronaves comerciales en el mundo se encuentran en América latina (Flightglobal, 2014a). En el año 2014, en todo el mundo han se han entregado 1600 aeronaves, donde el 9% ha sido en América Latina; esto se ha reflejado en un aumento de la capacidad interregional del 6,9% (Flightglobal, 2014b). Se espera que las aeronaves en servicio en esta región aumenten un 4,1% hasta el año 2033 (Airbus, 2014).

En el año 2014, en la región bajo estudio han cesado sus operaciones dos aerolíneas: Aerolíneas Estelar (Venezuela) y PAL Airlines (Chile). Se presentan en la siguiente lista los operadores que han comenzado sus actividades en el 2014:

- Golden Arrow Airways, Guyana : 2 Britten Norman 2A Mk III Trislander
- Rio Amazonas, Perú : 1 Fokker 50
- Sudamericana de Aviación. Ecuador: 2 Boeing 737-500
- TAME Amazona, Ecuador: 6 Quest Kodiak 100
- Avior Regional, Venezuela: 1 Fokker 50

Al año 2013, son 40 las aerolíneas que han realizado vuelos interregionales, donde en las 180 aerovías se han transportado aproximadamente 15 millones de pasajeros; se muestra a continuación la distribución de pasajeros transportados según las principales aerolíneas y los fabricantes de aeronaves.

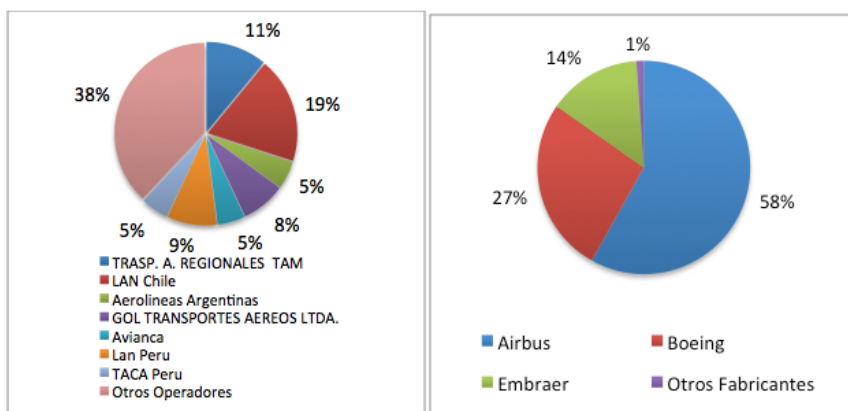


Figura 3. Distribución de los Pasajeros transportados por operador aéreo y fabricante de aeronave, Escenario 2013

3. Resultados

De acuerdo a las estadísticas analizadas, en el año 2013 para el transporte de pasajeros y carga entre los distintos países de la región se han utilizado 180 aerovías. Se muestra a continuación el consumo de combustible y las distintas emisiones gaseosas analizadas:

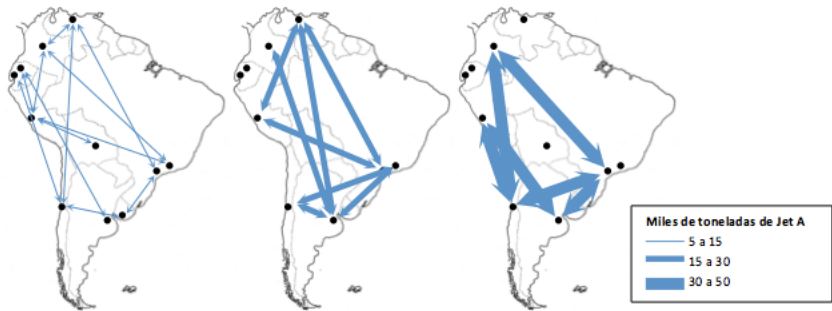


Figura 4. Consumo de combustible Jet A en las principales rutas aéreas de la región SAM, escenario 2013

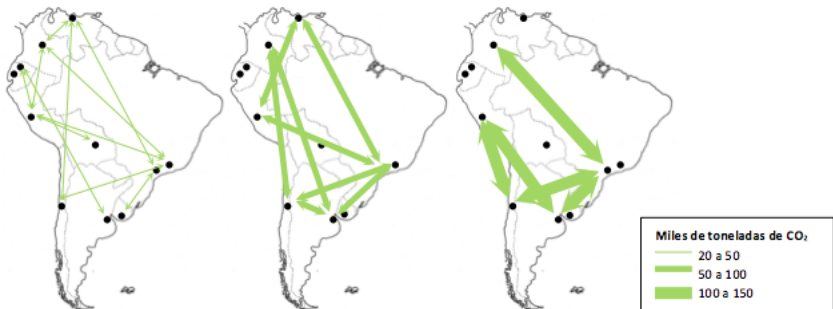


Figura 5. Emisiones de CO₂ en las principales rutas aéreas de la región SAM, escenario 2013

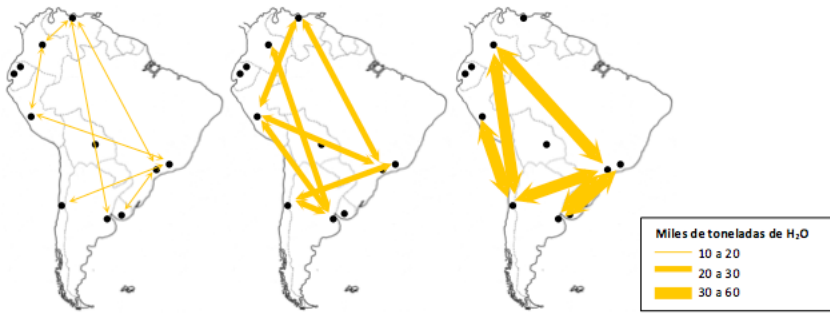


Figura 6. Emisiones de H₂O en las principales rutas aéreas de la región SAM, escenario 2013

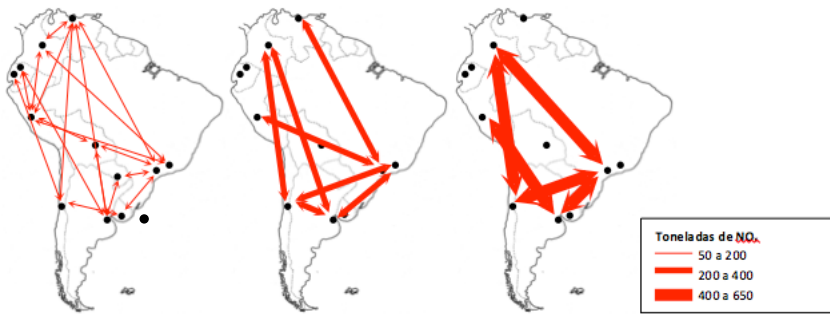


Figura 7. Emisiones de NO_x en las principales rutas aéreas de la región SAM, escenario 2013

De todos los gases contaminantes estudiados se observa que las rutas de Bogotá - San Pablo, Santiago - San Pablo, Buenos Aires - San Pablo y Santiago - Lima son las aerovías de mayor contaminación. De las 2 millones de toneladas de dióxido de carbono emitidas en el año 2013, en la ruta Santiago - San Pablo se emitió aproximadamente el 7% (150 mil toneladas de CO₂). Por otro lado el operador aéreo LAN Chile, transportando el 19% de los pasajeros en la región, emite el 20% de las emisiones de CO₂, el 24% de H₂O y el 22% de NO_x.

Se muestra a continuación la distribución del consumo de combustible de acuerdo a las principales aerolíneas y los fabricantes de aeronaves:

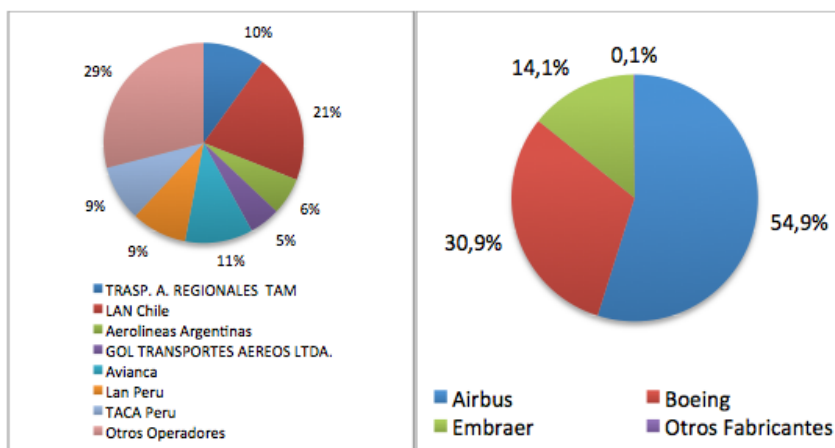


Figura 5. Distribución de consumo de combustible por operador aéreo y fabricante de aeronave, Escenario 2015

4. Conclusión

De acuerdo a las 180 rutas aéreas interregionales analizadas, se observa una gran concentración de las operaciones dado que aproximadamente el 50% de los pasajeros son transportados solo en 9 aerovías, las cuales unen principalmente las ciudades de Santiago, Buenos Aires y San Pablo, entre otras.

Por otro lado se destaca el peso relativo de los operadores aéreos TAM y LAN Chile, dado que juntos transportan el 30% de los pasajeros en toda la región y consumen el mismo porcentaje de combustible. Comparando las figuras 3 y 5 se observa como las aeronaves Airbus transportan casi el 60% de los pasajeros en la región y consumen menos del 55%. Dicha diferencia es consecuencia de la edad de flota y tipo de motores, entre otros.

Por otro lado, realizando un cálculo estimado del índice de emisiones por pasajero transportado (Emisiones CO₂/PAX) en distintas rutas, se obtuvo que el valor de dicho índice es la tercera parte del obtenido mediante el calculador online de OACI de emisiones de carbono (ICAO, 2008). Dicho análisis comparativo debe ser estudiado con mayor profundidad debido a las hipótesis adoptadas por OACI.

Análisis posteriores deberán tener en cuenta el estudio realizado mediante el uso de distintos software de simulación para la comparación y validación de los resultados aquí obtenidos.

Referencias

- Airbus (2014). Flying on demand: 2014 - 2033.
- Baughcum, S.L. Henderson, S.C. Hertel, P.S. Maggiora, D.R., Oncina, C.A. Stratospheric Emissions Effects Database Development.
- Baughcum, S.L. (1997). Aircraft Emission Inventory Projected in year 2015 for a high Speed Civil Transport Universal Airlines network, 7963(July).
- Brasseur, G.P., Cox, R., Hauglustaine, D., Isaksen, I., Lelieveld, J., Lister, D.H., Sausen, R., Schumann, U., Wahner, A., Wiesen, P. (1998). European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. *Atmos. Environ.*, 32(13), 2329-2418.
- European Environment Agency, *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013*, no. 12. 2013.
- Flightglobal (2014a). World Airliner Census.
- Flightglobal (2014b). Airline Market Review.
- Fuglestedt, J.S., Shine, K.P., Berntsen, T., Cook, J., Lee, D.S., Stenke, A., Skeie, R.B., Velders, G.J.M., Waitz, I. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. *Atmos. Environ.*, 44(37), 4648-4677.
- Gierens, K., Sausen, R., Schumann, U. (1999). A Diagnostic Study of the Global Distribution of Contrails Part II: Future Air Traffic Scenarios," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 63, no. 1999, pp. 1–9, 1999.
- Heywood, J.P. (1998). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Henderson, S.C., Wickrama, U.K., Baughcum, S.L., Begin, J.J., Franco, F., Greene, D.L., Lee, D.S., McLaren, M., Mortlock, K., Newton, P.J., Schmitt, A., Sutkus, D.J., Vedantham, A., Wuebbles, D.J. (1999). Aircraft Emissions: Current Inventories and Future Scenarios. *Aviat. Glob. Atmos.*, 290-331.
- ICAO (2008). Carbon Emissions Calculator.
- Kim, B. Fleming, G. Balasubramanian, S. Malwitz, A. Lee, J., Gillette, W. (2005). Inventories for 2000 through 2004. *Security*, no. September.
- Köhler, M.O., Rädcl, G., Dessens, O., Shine, K.P., Rogers, H.L., Wild, O., Pyle, J. (2008). Impact of perturbations to nitrogen oxide emissions from global aviation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113, 1–15.
- Lee, D.S., Fahey, D.W., Forster, P.M., Newton, P.J., Wit, R.C.N., Lim, L L., Owen, B., Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmos. Environ.*, 43, 3520–3537.
- Lee, J.J., B.S.M. Engineering (2005). *Modeling Aviation's Global Emissions, Uncertainty Analysis, and Applications to Policy*.

- Lukachko, S.P., Waitz, I. (1996). Effects of Engine aging on aircraft NOx Emissions. *Focus (Madison)*, 1–15.
- Penner, E., Lister, D. H., Griggs, D. J. Dokken, D.J., McFarland, M. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Groups I and II*. Cambridge Univ. Press. Cambridge, U.K, 373.
- Penner, J.E. (1999). *Aviation and the global atmosphere: a special report of IPCC Working Groups ...*, 373.
- Sausen, R., Gierens, K., Ponater, M., Schumann, U. (1998). A diagnostic study of the global distribution of contrails Part I: Present day climate. *Theor. Appl. Climatol.*, 61, 127–141.
- Simone, N.W., Stettler, M.E.J., Barrett, S.R.H. (2013). Rapid estimation of global civil aviation emissions with uncertainty quantification. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 25, 33-41.
- Stevenson, D.S., Doherty, R.M., Sanderson, M.G., Collins, W.J., Johnson, C.E., Derwent, R.G. (2004). Radiative forcing from aircraft NOx emissions: Mechanisms and seasonal dependence. *J. Geophys. Res. D Atmos.*, 109.
- Tarrason, L., Jonson, J.E., Berntsen, T.K., Rypdal, K. (2002). Study on air quality impacts of non-LTO emissions from aviation, *Contract*, 3.
- Van Ness, S. (1996). *Chemical Engineering Series*. Ed.McGRAW.
- Wild, O., Prather, M.J., Akimoto, H. (2001). Indirect long-term global radiative cooling from NOx emissions. *Geophys. Res. Lett.*, 28(9), 1719–1722.
- Wilkerson, J.T., Jacobson, M.Z., Malwitz, A., Balasubramanian, S., Wayson, R., Fleming, G., Naiman, D., Lele, S.K. (2010). Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6391-6408.
- Wuebbles, D., Gupta, M., Ko, M. (2007). Evaluating the Impacts of Aviation on Climate Change. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 88(14), 157.