



ESTUDIO DE HUELLA DE CARBONO QUE APORTA LA AVIACIÓN DE PASAJEROS DENTRO DEL
TERRITORIO COLOMBIANO. CASO DE ESTUDIO: AERONAVES TURBORREACTORES

DAVID ANDRÉS HIDALGO CARVAJAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ D.C.

2012

ESTUDIO DE HUELLA DE CARBONO QUE APORTA LA AVIACIÓN DE PASAJEROS DENTRO DEL
TERRITORIO COLOMBIANO. CASO DE ESTUDIO: AERONAVES TURBORREACTORES

DAVID ANDRÉS HIDALGO CARVAJAL

Proyecto de grado para optar al título de
Magister en Ingeniería Industrial

Asesor

ING. CARLOS FÚQUENE

Director Maestría

Ingeniería Industrial

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ D.C.
2012

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer al Ingeniero Carlos Fúquene quien, desde el comienzo de la idea del presente trabajo brindó una extraordinaria colaboración y guía, así como un compromiso destacable para con el desarrollo del mismo, sin las cuales este trabajo no habría sido logrado bajo los parámetros que se presenta.

De igual forma quiero agradecer al Doctor Edgar Rivera de la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil de Colombia, por proporcionar datos indispensables y de igual forma aportar sus conocimientos y experticia para el desarrollo del presente trabajo.

También deseo agradecer a todos mis amigos y amigas, quienes proporcionaron su apoyo, soporte y ayuda incondicionales para conmigo durante estos años.

Por último, quiero agradecer a mis padres, Francisco y Silvana, y a mi hermano Diego, con quienes estaré eternamente agradecido por hacer de mí, la persona que soy hoy en día.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3.	OBJETIVOS	10
4.	MARCO TEORICO.....	11
4.1	AVIACIÓN Y OTROS SERVICIOS DE TRANSPORTE	11
4.2	USO DE LA ENERGÍA EN LA AVIACIÓN.....	11
4.3	SOSTENIBILIDAD EN LA AVIACIÓN.	12
4.4	GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	12
4.4.1	PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO PROVENIENTES DE LA AVIACIÓN ..	13
4.5	INDICADORES AMBIENTALES	15
4.6	METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO	17
4.7	LA AVIACIÓN Y LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO	25
5.	ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	32
5.1	DEFINICIÓN DE META Y ALCANCE	33
5.2	UNIDAD FUNCIONAL	33
5.3	INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA.....	33
5.4	HUELLA DE CARBONO	34
6.	ANÁLISIS DE HUELLA DE CARBONO CON ENFOQUE DE CICLO DE VIDA APLICADO A LA AVIACIÓN	34
6.1	META	34
6.2	ALCANCE Y LÍMITES	35
6.3	UNIDAD FUNCIONAL	37
6.4	ETAPAS CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO DE HUELLA DE CARBONO	37
6.5	INVENTARIO DE HUELLA DE CARBONO.....	37
6.5.1	DIAGRAMA DE FLUJO	38
7.	IMPACTOS AMBIENTALES Y ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN.....	40
7.1	INTRODUCCIÓN	40
7.2	CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO	41
7.2.1	ETAPAS CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO DE HUELLA DE CARBONO	43
7.3	ALTERNATIVAS	60
7.3.1	ALTERNATIVAS ESPECÍFICAS.....	62

DURACIÓN (min)	68
7.3.2 ALTERNATIVAS GENERALES.....	70
7.4 ANÁLISIS FINANCIERO	74
7.5 MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE RUTAS AERONÁUTICAS – DESARROLLO EN FASE BÁSICA	78
8. CONCLUSIONES Y FUTURAS RECOMENDACIONES.....	86
9. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	89
10. METODOLOGÍA.....	89
10.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	89
10.2 CAMPO DE APLICACIÓN	89
10.3 SELECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS.....	89
10.4 RECURSOS	91
Bibliografía	92

Índice de Figuras

FIGURA 1. RESULTADOS TOTALES DE LAS EMISIONES DE GEI.....	5
FIGURA 2. PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN EN EMISIONES DE CO ₂ EQUIVALENTE POR CATEGORÍA DE FUENTE DESAGREGADA, AÑO 2004	6
FIGURA 3. HUELLA DE CARBONO PROYECTADA AL AÑO 2050	7
FIGURA 4. FASES DE UN CICLO DE VIDA (LCA)	18
FIGURA 5. EMISIONES DE LAS AERONAVES Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	27
FIGURA 6. EMISIONES DE LAS AERONAVES Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	28
FIGURA 7. ALCANCES CONSIDERADOS PARA EL PRESENTE ESTUDIO	36
FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO.....	38
FIGURA 9. DIAGRAMA DE FLUJO CON ENTRADAS Y SALIDAS POR PROCESO	38
FIGURA 10. CRECIMIENTO ECONÓMICO Y CRECIMIENTO DE TRÁFICO AÉREO	40
FIGURA 11. CRECIMIENTO DE EMISIONES DE CO ₂ A 2015 Y 2050.	41
FIGURA 12. ENTRADAS Y SALIDAS ETAPA AERONAVE.....	43
FIGURA 13. EMISIONES CO ₂ E ETAPA AERONAVE POR PROCESO DE MANTENIMIENTO	45
FIGURA 14. EMISIONES EN KG DE CO ₂ E DE LOS PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA AERONAVE Y EL HANGAR	46
FIGURA 15. EMISIONES DE RADIOACTIVIDAD EN KBQ.....	46
FIGURA 16. EMISIONES DE VAPOR AL AIRE EN MJ	46
FIGURA 17. EMISIONES EN KG DE CO ₂ E DE LOS PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA AERONAVE Y EL HANGAR PARA UN MISMO NÚMERO DE VUELOS DE AMBAS AERONAVES.	47
FIGURA 18. MODELO LOGÍSTICO DE TRANSPORTE PARA AIRBUS.	48
FIGURA 19. MODELO LOGÍSTICO DE TRANSPORTE PARA BOEING.....	49
FIGURA 20. ENTRADAS Y SALIDAS ETAPA PRE-VUELO	50
FIGURA 21. EMISIONES CO ₂ E ETAPA PRE-VUELO	50
FIGURA 22. EMISIONES EN KG DE CO ₂ E PARA PRE-VUELO A320.....	51
FIGURA 23. EMISIONES EN KG DE CO ₂ E PARA PRE-VUELO B727	52

FIGURA 24. ENTRADAS Y SALIDAS ETAPA VUELO	53
FIGURA 25. PORCENTAJE DE EMISIONES CO ₂ E POR AERONAVE.....	54
FIGURA 26. EMISIONES CO ₂ E ETAPA VUELO	54
FIGURA 27. EMISIONES CO ₂ E ETAPA VUELO A320.....	55
FIGURA 28. EMISIONES CO ₂ E ETAPA VUELO B727	56
FIGURA 29. ENTRADAS Y SALIDAS ETAPA VUELO	57
FIGURA 30. EMISIONES CO ₂ E ETAPA POS-VUELO	57
FIGURA 31. EMISIONES CO ₂ E ETAPA POS-VUELO A320	58
FIGURA 32. EMISIONES CO ₂ E ETAPA POS-VUELO B727	59
FIGURA 33. PORCENTAJE DE VUELOS A TIEMPO, DEMORADOS Y CANCELADOS EN 2010	66
FIGURA 34. COSTOS DIRECTOS RELACIONADOS CON LA OPERACIÓN DE UNA AERONAVE.....	75
FIGURA 35. COMPORTAMIENTO DE COLONIA DE HORMIGAS AL ENCONTRAR EL CAMINO MÁS CORTO	79

Índice de tablas

TABLA 1. COMPARACIÓN GENERAL ENTRE METODOLOGÍAS APLICABLES A MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO	22
TABLA 2. COMPARACIÓN ESPECÍFICA ENTRE METODOLOGÍAS	23
TABLA 3. EMISIONES GENERADAS POR LA COMBUSTIÓN DE KEROSENO.....	30
TABLA 4. EMISIONES POR ALCANCE DE ACUERDO A LA FUENTE.....	35
TABLA 5. EMISIONES POR ALCANCE DE ACUERDO A LA FUENTE.....	37
TABLA 6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS AERONAVES AIRBUS A320 Y BOEING B727	42
TABLA 7. MANTENIMIENTOS DE LAS AERONAVES DADO EN HORAS.	44
TABLA 8. ENFOQUES DE ACCIÓN.....	60
TABLA 9. GUÍA DE PROCEDIMIENTOS PROPUESTA.....	68
TABLA 10. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.....	72
TABLA 11. RUTAS DOMÉSTICAS CON MAYOR PARTICIPACIÓN DE PASAJEROS	73
TABLA 12. COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE AEROLÍNEAS EN COLOMBIA, DADOS EN PORCENTAJE.....	75
TABLA 13. PRECIO MENSUAL KEROSENO EN COLOMBIA (ÚLTIMOS 7 MESES).....	76
TABLA 14. COSTO Y APLICABILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂	77
TABLA 15. VIDA ÚTIL MATERIALES EMPLEADOS	91

Índice de Anexos

ANEXO A. INICIATIVAS PARA REDUCIR EL PESO EN LAS AERONAVES.....	A1
ANEXO B. INICIATIVAS CLAVE A NIVEL MUNDIAL PARA LA MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO.....	B1
ANEXO C. MÉTODOS DE UBICACIÓN DE EMISIONES, PROPUESTOS PARA LA AVIACIÓN INTERNACIONAL POR PARTE DE LAS NACIONES UNIDAS Y SU UNIDAD SBSTA.....	C1
ANEXO D. INVENTARIOS SUB-NACIONALES Y SUS TRATAMIENTOS PARA LAS EMISIONES DE AVIACIÓN.....	D1
ANEXO E. FACTORES DE CONVERSIÓN DE GASES LISTADOS EN EL PROTOCOLO DE KYOTO / MONTREAL.....	E1
ANEXO F. EMISIONES CALCULADAS EN LA ETAPA AERONAVE.....	F1
ANEXO G. LISTADO DE PAÍSES PROVEEDORES PARA BOEING Y PARA AIRBUS.....	G1
ANEXO H. EMISIONES CALCULADAS PARA LA ETAPA PRE-VUELO.....	H1
ANEXO I. EMISIONES CALCULADAS PARA LA ETAPA VUELO.....	I1
ANEXO J. EMISIONES CALCULADAS PARA LA ETAPA POS-VUELO.....	J1
ANEXO K. GUÍA DE PROCEDIMIENTOS PROPUESTA PARA PILOTAJE EFICIENTE.....	K1

1. INTRODUCCIÓN

La huella de carbono se define como el conjunto total de emisión de Gases de Efecto Invernadero - GEI o Greenhouse Gases – GHG, producidos por una organización, evento o producto. (Carbon Trust UK, 2008) Para facilitar su reporte o conteo se expresa en términos de la cantidad de Dióxido de carbono CO₂, equivalente de los otros GEI emitidos. El indicador *huella de carbono* hace parte del ciclo de vida de un producto, desde la consecución de las materias primas hasta la elaboración del mismo; el impacto a nivel ambiental que tienen los GEI tiene gran importancia, puesto que se convierte en uno de los factores más influyentes en el cambio climático, debido a las emisiones de GEI.

La medición de la huella de carbono de un producto, de una empresa o de una persona, crea beneficios para las organizaciones, puesto que al lograr identificar las principales fuentes de emisión de CO₂, permitirá el redefinir de mejor forma los objetivos, integrar políticas o estrategias de reducción de GEI, y proyectar iniciativas enfocadas al ahorro más efectivas.

Todas estas iniciativas apuntan hacia la toma de decisiones que ayuden a reducir los niveles de contaminación que generan las organizaciones y tomar correctivos para disminuir el impacto que está teniendo en el medio ambiente, teniendo alternativas como: desarrollos tecnológicos, mejora en procesos y manejo de productos, captura de carbono, estrategias de consumo responsable, entre otros.

A nivel mundial se están planteando varias alternativas y estrategias para disminuir la huella de carbono, entre las cuales, la de mayor acogida es la que apunta al consumo más responsable de los recursos por parte de los usuarios (Fundación Terra, 2008), la misma que invita a tomar conciencia acerca del daño que se le está ocasionando al medio ambiente con las elevadas cantidades de GEI, y la importancia de reducir dicho daño.

En Colombia, la necesidad de disminuir la huella de carbono, que actualmente se encuentra en un aporte al porcentaje total de 0,37% (Herrera M, N., 2010), se ve reflejada en el compromiso de las

empresas con el área de Responsabilidad Social Empresarial, las cuales buscan plantear estrategias para disminuir la emisión de estos Gases de Efecto Invernadero.

Según el Director de Proyectos del Centro Nacional de Producción Más Limpia, Carlos Toro, se afirma que dentro del contexto colombiano actual, la medición de la huella de carbono es todavía incipiente, aunque se hace necesario que las empresas reporten sus emisiones de carbono debido a las exigencias del mercado (*Ibidem*).

Dentro de la aviación colombiana, se han planteado muy pocas estrategias para lograr cumplir con este objetivo a nivel país. Por ejemplo, se conoce el registro de estrategia de las compañías aéreas Avianca y Aero República, las cuales han adoptado estrategias distintas para disminuir su huella de carbono (La República, 2010). La compañía Avianca renovó su flota de aeronaves, disminuyó el peso de las mismas, optimizó las distancias, rutas y consumo de combustibles en sus vuelos, diseñó un plan de gestión de residuos peligrosos y convencionales, e impartió 786.1 horas en capacitación en temas ambientales a 1.006 colaboradores (*Ibidem*). Por su parte, la compañía Aero República está trabajando continuamente en la renovación de su flota y en campañas activas de siembra de árboles en conjunto con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Aviatur y Acción Verde (*Ibidem*).

El presente proyecto pretende convertirse en una vía de consulta para la aviación colombiana ya que tiene como fin realizar el estudio de sistemas de medición empleados generalmente en el medio aeronáutico, definir el método adecuado para realizar la medición de huella de carbono de las aeronaves, y recomendar una perspectiva adaptable a la realidad nacional de Colombia teniendo en cuenta que debe cumplirse con la regulación de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) acerca de Protección del Medio Ambiente.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son gases de origen natural, que se encuentran presentes en la atmósfera y antropogénico, generados por las actividades humanas, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes (Berra & Finster, 2010). Esta propiedad causa el efecto invernadero ya que inhibe que determinados gases puedan salir de la atmósfera, ocasionando un recalentamiento del planeta (*Ibidem*)

Los principales GEI presentes en la atmósfera terrestre son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃), los cuales son producidos por todos los seres vivos en su ciclo natural. Entre los gases producidos totalmente por el hombre, se encuentran los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC), y los perfluorocarbonos (PFC) (IPCC, 2001).

La generación de estos GEI en altos niveles está directamente relacionada con la capacidad de Sostenibilidad o Sustentabilidad que tiene el ser humano con el planeta. La sostenibilidad o sustentabilidad son dos conceptos que nacen de la traducción del término “*sustainable development*” y que tienen claras diferencias en su definición. La sostenibilidad se define como la capacidad que tiene el ser humano de “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras de atender sus propias necesidades” (“Meet the needs of the present generation without compromising the ability of future generations to meet their own needs”) (Bruntland et al., 1987). La sostenibilidad se define también como “el equilibrio de una especie con los recursos de su entorno” (Achkar, 2005). Por su parte, para Dixon y Fallon, han definido tres usos distintos del concepto de sostenibilidad: “El primero como concepto puramente físico para una clase especial de recursos biológicamente renovables, tales como los recursos pesqueros o forestales. El segundo como concepto físico para un grupo de recursos o ecosistemas. El tercero como concepto socio- económico para sugerir el aumento sostenido del nivel de bienestar individual y social.” (Becker, 1995). Se define un proceso sostenible como “un proceso que ha desarrollado la capacidad para producir indefinidamente a un ritmo en el cual no agota los recursos que utiliza y que necesita para funcionar y no produce más contaminantes de los que puede absorber su entorno” (Ramírez Treviño et al., 2004).

Por otro lado, la sustentabilidad está definida como “el estado de condición (vinculado al uso y estilo) del sistema ambiental en el momento de producción, renovación y movilización de sustancias o elementos de la naturaleza, minimizando la generación de procesos de degradación del sistema (presentes o futuros)” (Achkar, 2005). El desarrollo sustentable es un “proceso dinámico que le permite a las personas alcanzar su potencial logrando así una mejor calidad de vida, simultáneamente recuperar y proteger los sistemas que le dan soporte a la vida en la Tierra” (Green Energy, 2000) De acuerdo a la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, el desarrollo sustentable se define como “un proceso de mejoría económica y social que satisface las necesidades y valores de todos los grupos interesados, manteniendo las opciones futuras y conservando los recursos naturales” (UICN, 1990). Por su parte la Organización de Alimentos y Agricultura de Estados Unidos de Norteamérica (FAO) define el desarrollo sostenible “como el manejo y conservación de la base de recursos naturales y la orientación del cambio tecnológico e institucional, de tal manera que asegure la continuidad de las necesidades humanas para las generaciones presentes y futuras” (FAO, 1991). La sustentabilidad se define como “la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas” (UNFCCC - SBSTA, 1996).

Al revisar las definiciones para sostenibilidad y sustentabilidad, se encuentra que hay similitud en las mismas, así como en su interpretación. Para encontrar una clara diferencia entre las dos definiciones, se debe separar las definiciones que implican “apoyo, firmeza, seguridad, base” así como las definiciones que implican “alimentación, nutrición y manutención”. Así se encuentra entonces que *Sostenible* se refiere al sistema en su estructura interna, tendiendo ésta a permanecer firme e inalterable en el tiempo. Como contraparte se encuentra que *Sustentable* se refiere a la parte externa del sistema, de lo que se alimenta y nutre, brindándole los medios de supervivencia, para que pueda expandirse en el ámbito espacio temporal.

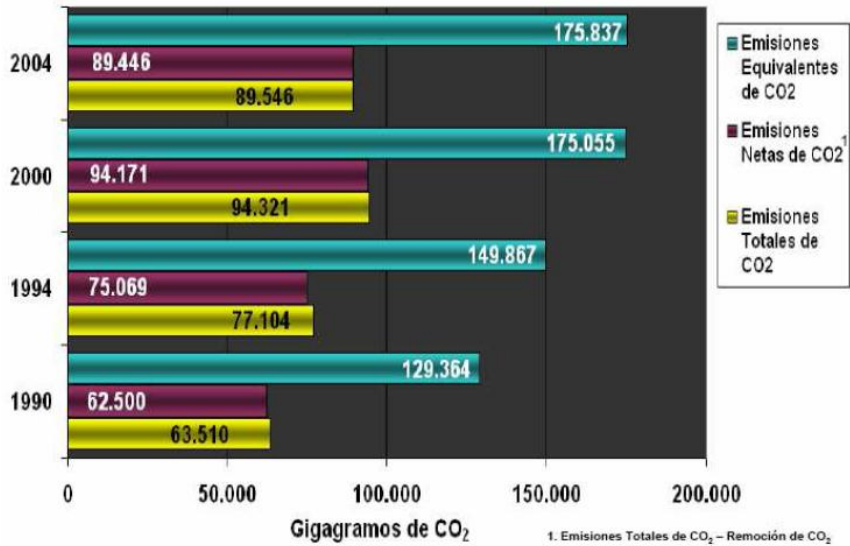
Existen varias industrias y factores que directamente inciden en la generación de GEI, tales como la ganadería, el transporte marítimo, terrestre y aéreo, la agricultura, industrias productoras de energía, industrias madereras, metalúrgicas, entre otros. Entre las industrias mencionadas anteriormente se destaca la aviación a nivel mundial como unos de los factores de mayor

incidencia, con una producción del 2% del total de niveles de huella Gases Efecto Invernadero y proyectada a crecer (ICAO, 2004).

La medición de huella ecológica de acuerdo con la realidad de Colombia ha determinado que en promedio, el consumo de recursos naturales es de 1,3 hectáreas de tierra productiva por persona para una ciudad con un número promedio de habitantes (Grupo de Mitigación de Cambio Climático, 2009). Al contraponerlo con las necesidades de consumo para una ciudad colombiana con un número mayor de habitantes, se halló un aumento en el consumo de recursos entre 3 y 6 hectáreas productivas por persona (*Ibidem*).

La cantidad total de emisiones de GEI producidos en Colombia resulta de la diferencia entre la cantidad total de CO₂ y las cantidad de CO₂ removido de la atmósfera. A continuación se presentan los resultados totales de emisiones de GEI de Colombia (Figura 1) desde el año 1990 hasta el año 2004. Los datos presentados por el Grupo de Mitigación de Cambio Climático están dados en giga gramos de CO₂, que equivalen a una tonelada de CO₂

Figura 1. Resultados Totales de las Emisiones de GEI



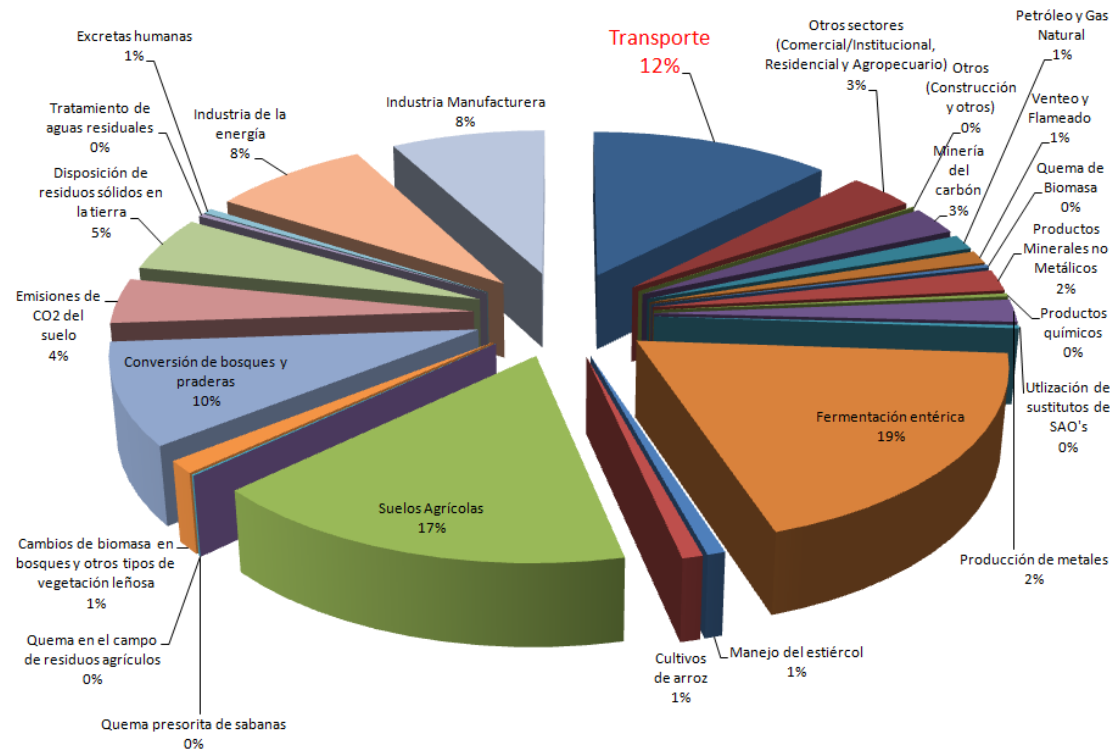
Fuente: Grupo de Mitigación de Cambio Climático

De acuerdo con el seguimiento histórico presentado en la Figura 1, es notorio un incremento respecto al tiempo de las emisiones equivalentes (medida estándar para comparar emisiones de

diferentes GEI) de CO₂ en Colombia, así como también es apreciable una reducción en las emisiones netas (Cantidad total de CO₂ producido – cantidad total de CO₂ removido de la atmósfera) de CO₂ entre el año 2000 y el año 2004.

Al total de emisiones de GEI, el porcentaje que aporta el transporte, incluido aéreo y terrestre, es del 12,4%. En la Figura 2 se puede apreciar cuáles son las fuentes de mayores emisiones de GEI en Colombia.

Figura 2. Porcentaje de participación en emisiones de CO₂ equivalente por categoría de fuente desagregada, año 2004



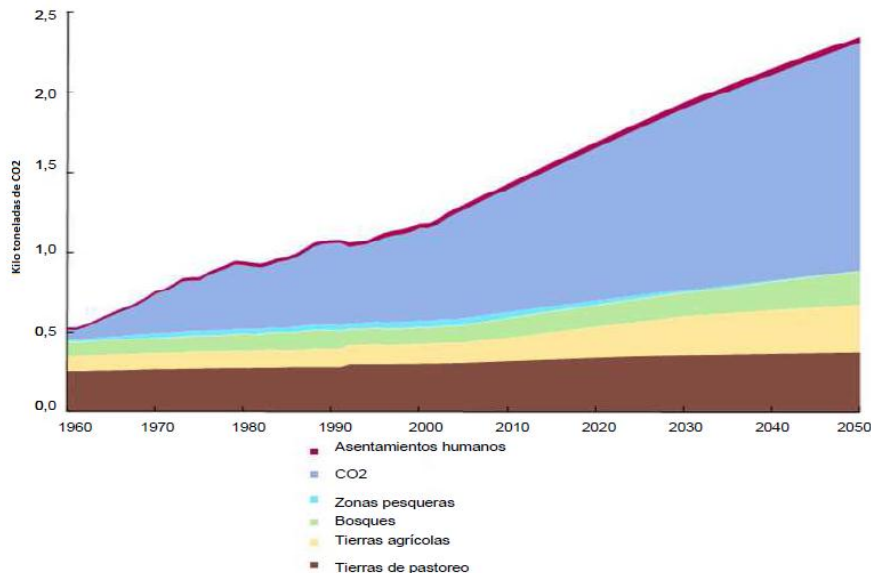
Fuente: Adaptado de Grupo de Mitigación de Cambio Climático, 2009

Como se puede apreciar en la Figura 2, las principales fuentes de contaminación en Colombia son: Fermentación entérica, Suelos agrícolas y el Transporte. Teniendo en cuenta que el impacto del transporte en Colombia es la tercera fuente de aporte (12.4%), se hace necesario identificar oportunidades de mejora en las operaciones y en los procesos relacionados con el transporte aéreo. Para ello se puede emplear la Logística Ambiental definida por Parrado & Bojacá, en la que

se consideran los impactos ambientales provenientes de la combustión relacionada a los combustibles fósiles.

Las emisiones provenientes del combustible quemado por las aeronaves generan gases de efecto invernadero tales como dióxido de carbono CO₂, óxido nitroso N₂O, metano CH₄ y otros subproductos. La cantidad de combustible consumido dependerá directamente del tipo de combustible, tipo de aeronave empleada, tipo de motor, carga del motor y altura de vuelo (IPCC, 2000); dichos factores incidirán en forma directa en la cantidad de GEI y subproductos generados, los cuales afectan la calidad del aire a diferentes alturas. En la Figura 3 se aprecian las proyecciones de huella de carbono al año 2050, respecto a niveles de CO₂ y otras fuentes de generación de GEI.

Figura 3. Huella de carbono proyectada al año 2050



Fuente. Ewing, et al., 2008

“En Colombia, actualmente no existe una legislación dirigida a reducir los índices de contaminación por dióxido de carbono CO₂ en la aviación, a pesar de ello existen algunas iniciativas individuales presentadas por algunas compañías aéreas, que intentan avanzar hacia la disminución de GEI. En el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, como tampoco en la Unidad Especial

Administrativa de la Aeronáutica Civil existen reglamentos al respecto” (Rivera, 2010). Es por ello que el presente proyecto pretende realizar un estudio de la huella de carbono del sector aeronáutico en Colombia, buscar alternativas para reducir los niveles de emisiones y sugerir medios de compensación con el medio ambiente, empleando para ello aeronaves del tipo turboreactor como muestra poblacional. De igual forma para el presente estudio se tendrá en cuenta las regulaciones de las emisiones de GEI propuestas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en su *Anexo 16* sobre Protección del Medio Ambiente.

En varios países se están realizando ya iniciativas para disminuir la huella de carbono generados por la aviación, entre los cuales se cuentan estrategias como la reducción de peso, la modernización de la flota de aviones, programas de compensación ambientales, entre otros. Dichas iniciativas podrían ser adaptadas a la realidad de Colombia una vez se haya realizado la respectiva cuantificación de los GEI. En el Anexo A se muestran algunas de estas iniciativas adoptadas por varios países.

A nivel internacional se han realizado avances tecnológicos, se han establecido regulaciones y acuerdos, se han contemplado políticas y sanciones económicas, con el fin de obtener una reducción en las emisiones, sin embargo, de todas estas iniciativas son muy pocas o prácticamente nulas las que en la realidad de Colombia se aplican o se toman en cuenta.

Tomando en cuenta que el transporte aéreo hace parte de la tercera fuente de generación de GEI en Colombia, es importante entonces evaluar las alternativas posibles para reducir el porcentaje que aporta la aviación al total de la huella de carbono. Se debe tener en cuenta las proyecciones actuales globales de contaminación y las predicciones hacia el futuro, para entender la gravedad del problema y buscar soluciones eficientes

Se hace necesario entonces revisar los sistemas de medición, estrategias y reglamentos existentes referentes al tema, a fin de reducir la huella de carbono que emiten las aeronaves de diversas compañías aéreas en el territorio colombiano. El objetivo de realizar este proyecto es soportar la estrategia nacional que diseña actualmente el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial para disminuir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que actualmente aporta Colombia al medio ambiente, mediante la medición de la cantidad de gases de

efecto invernadero producidos por dos aeronaves turborreactores, utilizadas como caso de estudio.

Es por ello que es necesario realizar la presente investigación, a fin de generar una baja incertidumbre en las estimaciones de las emisiones que tiene la aviación en el territorio colombiano, evaluar el impacto real de las mismas, complementar las iniciativas que algunas empresas aeronáuticas están tomando para disminuir su huella de carbono y promover buenas prácticas en la industria aeronáutica.

3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la huella de carbono del sector aeronáutico de transporte pasajeros en Colombia, para la generación de estrategias de reducción y compensación, empleando como caso de estudio aeronaves de motor turboreactor.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio comparativo entre los diferentes métodos de medición de huella de carbono para realizar la escogencia adecuada de la metodología a emplear
- Establecer y analizar los puntos críticos de los procesos del sector aeronáutico en lo referente a ineficiencias y emisiones presentes.
- Desarrollar una propuesta de mejoramiento al desempeño ambiental del sector aeronáutico, mediante controles y buenas prácticas a ser implementados.

4. MARCO TEORICO

4.1 AVIACIÓN Y OTROS SERVICIOS DE TRANSPORTE.

Las comunicaciones y el transporte son un medio fundamental para el alcance del desarrollo y del comercio, por lo que la ONU ha trabajado constantemente en cada una de las esferas relacionadas con estos temas, especialmente en lo relativo a la reglamentación, con el fin de lograr transporte y comunicaciones más coordinados, seguros y eficientes (ONU, 2000). La amplia red de los servicios de transporte ofrece la libertad de viajar por las naciones y regiones, permite a los individuos facilitar el intercambio de experiencias culturales y educativas. Entre los medios de transporte, la aviación es el más eficiente y seguro, además de generar un alto impacto positivo en la sociedad, generando más de 32 millones de empleos y se estima que su impacto económico global está en 3.650 billones de dólares.

La flota aeronáutica del mundo ha triplicado su tamaño en los últimos 25 años, pero el promedio de edad de la flota ha permanecido constante por alrededor de 11 años. El ruido generado por una aeronave moderna es menor al 15% de una aeronave más antigua, de las mismas características. El consumo de combustible de las aeronaves modernas es similar al de los vehículos modernos y de trenes de alta velocidad.

Desde una perspectiva global, la industria de la aviación es crucial para el mercado mundial, se estima que alrededor de un tercio del comercio mundial es transportado vía aérea. Además del impacto económico, la aviación juega un rol principal al conectar las comunidades alrededor del mundo

4.2 USO DE LA ENERGÍA EN LA AVIACIÓN.

La energía empleada por la industria aeronáutica es tanto del tipo directo como indirecto:

- La energía directa se define como la energía que ingresa al sistema y puede estar en forma primaria (combustible) o intermedia (electricidad). (The Greenhouse Gas Protocol, 2004)
- La energía indirecta se define como el consumo de energía primaria que se necesita para que funcione el sistema.

La aviación en la actualidad emplea energía proveniente de diversas fuentes para su funcionamiento y ejecución de sus operaciones, entre las cuales se encuentran el combustible fósil y la energía eléctrica, como energías principalmente utilizadas. Las emisiones asociadas a el uso de

ésta energía serán analizadas durante el desarrollo del presente proyecto. Actualmente se están empleando energías renovables (eólica, solar y biocombustibles), que permiten tener unas emisiones locales de gases de efecto invernadero (GEI) bajas o nulas (AENA, 2011).

4.3 SOSTENIBILIDAD EN LA AVIACIÓN.

La sostenibilidad, por definición, se refiere a algo que puede mantenerse en el tiempo indefinidamente sin colapsar o deteriorarse, como los procesos naturales que se han mantenido por millones de años. La aplicación de la sostenibilidad en la aviación se refiere al cómo emplear los recursos en la mejor forma, logrando maximizar el desempeño por medio de la optimización del uso de recursos necesarios para que la industria funcione.

El transporte aéreo comercial mantiene los vínculos internacionales que permiten conectar más de 220 países con servicios programados, con más de 36.000 aeropuertos con servicios directos. (ICAO, 2011). De acuerdo con Brian Pearce, Economista Jefe de la Asociación del Transporte Aéreo Internacional (IATA), *“el papel de la aviación sigue siendo fundamental para todos los aspectos del progreso social y económico y, en el aspecto ambiental, las metas de emisiones acordadas por la OACI tienen un apoyo generalizado entre todas las partes interesadas de la aviación”*. El transporte aéreo desempeña un papel importante en el apoyo del desarrollo económico y social, siendo un pilar fundamental como conexión entre los países y economías de los mercados extranjeros.

La tasa de crecimiento del transporte aéreo civil desde los años cincuenta ha implicado costos ambientales, para los cuales actualmente se están realizando esfuerzos para minimizar y reducir sus efectos. Las emisiones de la aviación representan alrededor del 2% de las emisiones de CO₂ de la combustión de combustibles, alrededor de un 12% de las emisiones de CO₂ del sector de transporte actual (ICAO, 2011). De acuerdo con IATA, debido a los altos costos del combustible, ya se estimula el uso eficiente de la energía y con ello, el reducir las emisiones de CO₂ en la industria. La industria de la aviación ha reconocido su obligación de ser parte de la solución al problema del cambio climático, empleando biocombustibles sostenibles y materiales ligeros para disminuir las emisiones de CO₂.

4.4 GASES DE EFECTO INVERNADERO

Se conoce como gases de efecto invernadero (GEI) a aquellos gases que al estar presentes en la atmósfera, contribuyen a la creación del efecto invernadero, es decir, que retienen parte de la energía que el suelo emite al haber sido calentado por la radiación solar (IPCC, 2001). Los gases

que tienen un mayor impacto en la creación de este efecto invernadero son el metano CH₄ y el dióxido de carbono CO₂, los cuales son producidos por la actividad humana y con el consumo irresponsable de los recursos (Ewing, y otros, 2008). Se conoce ampliamente los efectos que los gases de efecto invernadero tienen en la atmósfera del planeta, afectando de forma significativa a la capa de ozono y aportando al cambio climático.

Hay varias industrias y factores que directamente inciden en la creación de estos GEI, tales como la ganadería, el transporte marítimo, terrestre y aéreo, la agricultura, industrias productoras de energía, industrias madereras y metalúrgicas, entre otras; Entre las industrias mencionadas anteriormente, se destaca la aviación como unos de los factores de mayor incidencia; este sector aporta en la actualidad, el 2% del total de gases efecto invernadero, referenciados en CO₂ equivalente en la huella de carbono (*carbon footprint*) y con tendencia a crecer (ICAO, 2004).

4.4.1 PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO PROVENIENTES DE LA AVIACIÓN

Dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂ afecta la atmósfera directamente, y dependiendo de la concentración de moléculas afecta la habilidad de la tierra para absorber la radiación emitida por en superficie y la atmósfera baja. La aviación es responsable del 2% del total de emisiones antropogénicas de CO₂. En términos de calentamiento global es una gran preocupación ya que el CO₂ puede permanecer en la atmósfera por cientos de años. El CO₂ emitido por las aeronaves es mezclado con CO₂ proveniente de otras fuentes; de cualquier forma, como las aeronaves jet han estado en servicio desde hace 50 años, las concentraciones de CO₂ provenientes exclusivamente de las aeronaves son difíciles de calcular (Whitelegg & Cambridge, 2004).

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

NO_x es un término común utilizado para referirse a tres especies de óxidos de nitrógeno: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido nitroso (N₂O), un gas de efecto invernadero que se acumula en la atmósfera con otros gases, conllevando a un aumento en la temperatura de la Tierra a través del tiempo. El NO₂ es un agente oxidante que reacciona en el aire para formar ácido nítrico, así como los nitratos orgánicos tóxicos. También juega un rol mayor en la reacción atmosférica que produce ozono a nivel tierra o smog fotoquímico. Las aeronaves son responsables de las emisiones del NO_x en altitudes entre los 8 y los 15 kilómetros. NO_x puede reaccionar con otras sustancias en el aire para formar ácidos que se depositan como lluvia, niebla, nieve y

partículas secas. Puede ser trasladado por el viento por cientos de kilómetros, causando contaminación ambiental e impactos fuera del sitio de emisión. *Ibidem*.

Ozono (O₃)

El ozono es un gas de efecto invernadero que se forma como resultado de la reacción foto-química entre el NO_x y la atmósfera. El ozono es un escudo para el planeta en contra de la radiación solar ultravioleta. En la estratósfera el NO_x puede llevar a un agotamiento del ozono a una tasa del 3 por ciento (VCÖ, 1997). En los niveles inferiores (tropósfera y tropopausa) el ozono puede ser perjudicial para los humanos y plantas, ocasionando problemas respiratorios.

Metano (CH₄)

Además de incrementar las concentraciones troposféricas del ozono, las emisiones de NO_x disminuyen indirectamente la concentración de metano. La reducción de CH₄ conlleva al enfriamiento de la superficie terrestre (IPCC, 1999).

Los cirros, el vapor de agua (H₂O) y las estelas de vapor.

Los cirros son nubes que se forman a grandes altitudes, mayores a 6 km. Están compuestas por cristales de hielo formadas a partir del congelamiento del vapor de agua. El vapor de agua es un gas de efecto invernadero y se forma como un co-producto de la combustión de keroseno a gran altura, condensándose para formar estelas. Las estelas cubren alrededor del 0.1 por ciento de la superficie terrestre en promedio (IPCC, 1999). Dependiendo de las condiciones meteorológicas pueden permanecer visibles durante varias horas, con la capacidad de unirse a otras estelas y formar cirros. El vapor de agua puede permanecer en la tropósfera hasta por nueve días y en la estratósfera durante semanas o meses, potencializando la fuerza radiativa y sus efectos durante este período de tiempo (VCÖ, 1997). Aproximadamente entre el 10 y 20 por ciento de los vuelos comerciales ocurren bajo condiciones atmosféricas que propician la formación de estelas y cirros.

Dióxido de azufre (SO₂)

El azufre en el combustible se oxida cuando se quema, formando SO₂, un gas incoloro y ácido. Puede reaccionar con el agua para formar estelas y puede depositarse bajo la forma de sulfato (H₂SO₄) o lluvia ácida. A nivel de suelo puede causar problemas respiratorios, como asma y problemas pulmonares (DEFRA, 2010).

Monóxido de carbono (CO)

Es un producto intermedio causado por la combustión y tiene a ser producido cuando la aeronave se encuentra en tierra. Dependiendo de la concentración y exposición, se pueden experimentar varios problemas en la salud humana. (Whitelegg & Cambridge, 2004)

Compuestos volátiles orgánicos (VOCs)

VOCs incluyen diferentes químicos, muchos de los cuales se relacionan a problemas de salud humana. Estos compuestos incluyen hidrocarburos tales como etanos, isopreno, benceno y tolueno, y son el resultado de combustible no quemado o parcialmente quemado. Algunos como el benceno están relacionados con incrementar el riesgo de leucemia en los adultos, mientras otros tienen el potencial para causar calentamiento global cuando reaccionan en la atmósfera para formar ozono.

4.5 INDICADORES AMBIENTALES

Un indicador es la medida cuantitativa o la observación cualitativa que permite identificar cambios en el tiempo y cuyo propósito es determinar qué tan bien está funcionando un sistema, dando la voz de alerta sobre la existencia de un problema y permitiendo tomar medidas para solucionarlo, una vez se tenga claridad sobre las causas que lo generaron. (DEFRA, 2010).

Los indicadores ambientales pueden ser clasificados en tres grandes grupos:

- **Indicadores de desempeño:** miden la eficiencia y el desempeño ambiental de las operaciones o procesos dentro de la organización.
- **Indicadores de gestión:** miden los esfuerzos de la gerencia para influenciar el desempeño ambiental de la organización.
- **Indicadores de condición ambiental:** proporcionan información acerca de las condiciones del ambiente en el ámbito local, regional o global. (Ewing, y otros, 2008)

Entre los indicadores de desempeño ambiental se cuentan:

- La huella ecológica (*ecological footprint*), que es un indicador del impacto ambiental generado por la demanda humana que se hace de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta relacionándola con la capacidad ecológica de la Tierra de regenerar sus recursos (Ewing, y otros, 2008). La huella ecológica, como indicador, “puede

ser utilizado para medir y manejar el uso de los recursos de forma económica, siendo comúnmente utilizado para explorar la sustentabilidad de los estilos de vida, bienes, servicios y organizaciones, a nivel nacional e internacional“ (Achkar, 2005). Representa el área de tierra, agua y volumen de aire productivos, necesarios para generar los recursos y asimilar los residuos producidos por cada organización, producto o servicio, de forma indefinida, expresándose en unidades de hectáreas consumidas por persona (Global Footprint Network, 2012). A partir de la huella ecológica tiene su nacimiento la huella hídrica y la huella de carbono, ampliamente conocidas en la actualidad, pero que no miden de forma holística el impacto total generado sobre el medio ambiente, sino sus impactos individuales.

- La huella hídrica (*water footprint*), que es el volumen total de agua dulce usado para confeccionar los bienes y servicios producidos por una empresa, o consumidos por un individuo o comunidad. El uso de agua se mide por el volumen de agua consumida, evaporada o contaminada, ya sea por unidad de tiempo para individuos y comunidades, o por unidad de producto para empresas. La huella de agua se puede calcular para individuos, familias, organizaciones, agencias de gobierno, ciudades, productores, sectores económicos, etc. La huella de agua como indicador, está vinculado estrechamente con el ámbito geográfico. Las aguas se clasifican en Azules, Verdes y Grises (Greater London Authority, 2003).
- La huella de carbono (*carbon footprint*), que es la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto (Carbon Trust UK, 2008).

Para el presente estudio se realizará el cálculo de huella de carbono, la cual se define como la medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero producidos por las actividades humanas (individuales, colectivas, eventuales y de los productos) en el medio ambiente (Schneider & Samaniego, 2010). Está referida a la totalidad, en toneladas o kilogramos, de CO₂ equivalente de GEI, producida día a día, generada a partir de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía, calefacción, alimentación, metalurgia, agricultura, floricultura, producción textil, manufactura en general y transporte; se incluye también las emisiones de GEI producidos por la generación de electricidad, uso de refrigerantes, halocarburos, hidrofluorcarburos y perfluoratos, generación de vapor de agua, entre otros procesos químicos. El cálculo de la huella de carbono se

rige por los principios del Protocolo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y por la norma ISO 14064 (Schneider & Samaniego, 2010).

De acuerdo al Protocolo de Gases de Efecto Invernadero es necesario identificar las fuentes de emisiones a ser incluidas en la medida, para definir los límites operacionales de una industria (WBCSD & WRI, 2004) El Protocolo establece tres ámbitos de emisiones principales para el cálculo de huella de carbono:

- **Ámbito 1:** emisiones directas, desde fuentes propias o controladas por la empresa; Ejemplo, las emisiones derivadas de la quema de combustible o por procesos químicos.
- **Ámbito 2:** emisiones indirectas derivadas de la generación, por parte de terceros, de energía, calor o vapor.
- **Ámbito 3:** otras emisiones indirectas que son consecuencia de las actividades de la organización y que ocurren fuera de ésta y no son controladas o generadas por la misma; Ejemplo, los viajes, la gestión y disposición de residuos, la producción de insumos, entre otros.

El primero de estos ámbitos compone la *Huella Primaria*, que es la medida de las emisiones directas de CO₂, a partir de la quema de combustibles fósiles. Los otros dos ámbitos hacen parte de la *Huella Secundaria*, que es la medida de las emisiones indirectas de CO₂ de todo el ciclo de vida de los productos finales, obtenidos por los diversos procesos productivos de los bienes y servicios consumidos (Berra & Finster, 2010).

Para la medición o contabilidad de huella de carbono se han desarrollado diversos modelos y métodos, que han sido propuestos por organizaciones de todo nivel que buscan ser más competitivas y reducir sus niveles de contaminación. Algunos métodos han sido patrocinados por gobiernos para conseguir estándares nacionales aplicables en la toma de decisiones de los procesos productivos. Entre estos países se encuentran Alemania, Estados Unidos, Francia, Japón, Nueva Zelanda y Reino Unido (CEPAL, 2010). En el Anexo B se presentan algunas iniciativas clave a nivel mundial para la medición de huella de carbono en diversos productos y servicios.

4.6 METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO

Una vez establecidas las iniciativas para la medición de huella de carbono, se generan las metodologías estándar internacionales. Entre las metodologías más representativas para la

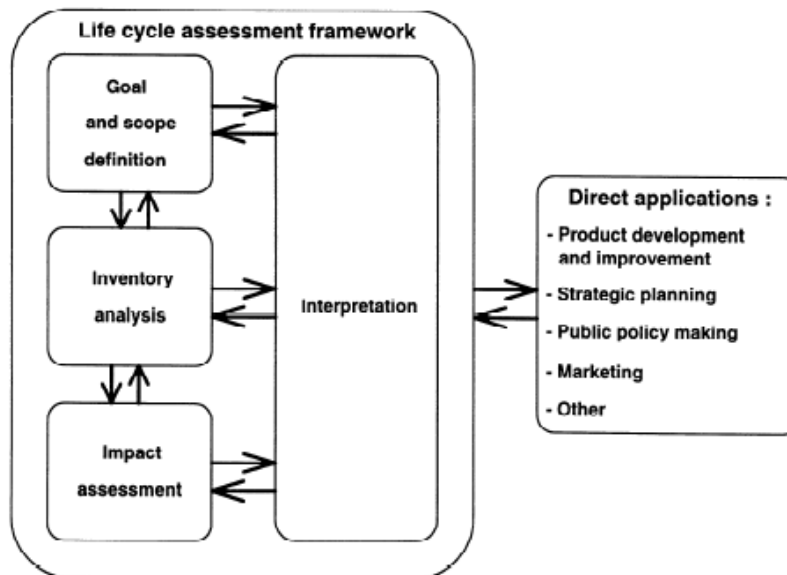
medición de huella de carbono se encuentran los estándares ISO, los lineamientos de Carbon Trust con su PAS 2050, el GHG Protocol y las guías del Panel Intergubernamental por el Cambio Climático (Intergovernment Panel on Climate Change – IPCC).

Estándares ISO

Existen varios estándares ISO relacionados al análisis de huella de carbono en distintos niveles de los sistemas. Es posible cuantificar la huella de carbono para un producto o servicio usando análisis de ciclo de vida descrito en los estándares ISO 14040 y 14044 (2006) o a nivel de la compañía u organización como se describe en el estándar ISO 14064-1 (2006).

A nivel de producto, la huella de carbono es un indicador entre una variedad de indicadores que se cuantifican dentro del análisis de ciclo de vida - **LCA** (Wiedmann & Minx, 2007). En la Figura 4 se describen las cuatro fases del ciclo de vida: definición de la meta y el alcance, el análisis del inventario, el análisis del impacto de ciclo de vida (LCIA) y la interpretación.

Figura 4. Fases de un ciclo de vida (LCA)



Fuente: Estándar Internacional ISO 14040, 2006

- En la meta y alcance se definen el propósito del estudio, el alcance en tiempo, geografía y tecnología, la función a estudiar y el sistema correspondiente al LCA a aplicar.

-
- En el análisis de inventario se cuantifican los recursos consumidos y las emisiones al medio ambiente en todas las etapas del ciclo de vida. (Guinée, y otros, 2002)
 - Para el impacto ambiental en el LCA se emplea un modelo de caracterización para convertir los datos del análisis de inventario en resultados por indicador (Guinée, y otros, 2002). Para la huella de carbono, los factores de caracterización se llaman Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential – **GWP**) y está basado en las guías del IPCC.
 - La fase de interpretación es donde los resultados son resumidos y discutidos como base para conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo a la meta y alcance establecidos. (ISO, 2006)

Así mismo se cuenta con las normas ISO 14064 y 14065, “*cuyo objetivo es generar credibilidad y confiabilidad a los reportes de emisión de GEI y a las declaraciones de reducción o eliminación de GEI*” (CEPAL, 2010). Dichas normas son aplicables a todos los tipos de GEI, puesto que no se limitan a CO₂. En la norma ISO 14064 (2006) el enfoque es la contabilización, reducción y verificación de GEI de distintas organizaciones (ISO, 2009). En la norma ISO 14065 (2007) se busca confiabilidad en los procesos de verificación y validación de las emisiones de GEI. (ISO, 2009)

Los estándares ISO para LCA no describen como tal un método en particular, pero permiten a las organizaciones una flexibilidad para el desarrollo de distintos indicadores, entre los cuales se cuenta la huella de carbono.

GHG Protocol

Los estándares de *GreenHouse Gases Protocol* fueron implementados en 2001 como un “*marco metodológico general que da pautas de trabajo para la determinación de herramientas de cálculo de GEI*” (The Greenhouse Gas Protocol, 2004).

Se plantea como una colaboración entre empresas, organizaciones no gubernamentales y el estado, cuya meta es establecer bases para contabilizar las emisiones de GEI. De igual forma, se constituye como un referente de lineamientos generales para el cálculo de huella de carbono, puesto que ha desarrollado un conjunto de herramientas, tanto para huella de carbono de

empresa como de producto. A partir de éste estándar se generan los métodos Bilan Carbone y PAS 2050.

Carbon Trust – PAS 2050

La iniciativa desarrollada por Carbon Trust, DEFRA y BSI para el Reino Unido apunta a *“aplicar LCA sobre una amplia variedad de productos en forma consistente para usuarios de la industria, enfocándose solamente en el indicador de Huella de Carbono”*. (Carbon Trust, 2007)

La meta y alcance para este indicador tiene asunciones específicas que requieren de algunas asunciones y simplificaciones arbitrarias, con el fin de organizar los resultados a través de las distintas categorías de productos. La metodología aplicada por Carbon Trust en 2008, distingue dos análisis específicos: negocio-consumidor y negocio-negocio. En análisis de negocio-consumidor incluye las emisiones del ciclo de vida completo de un producto, es decir, de la cuna a la tumba, mientras que el análisis de negocio-negocio incluye las emisiones de GEI emitidas y el punto de ingreso de las materias a la organización, es decir, desde la cuna hasta la puerta. (PAS 2050, 2008) El método de Carbon Trust está enfocado netamente en la industria o producción.

El PAS 2050 es aplicable a organizaciones que miden sus emisiones de GEI relacionadas a productos a través de su ciclo de vida y a organizaciones que miden sus emisiones de GEI de productos de la cuna a la puerta.

Carbon Trust – PAS 2060

Al igual que el PAS 2050, fue desarrollada por instituciones británicas en 2009. El fin de ésta herramienta es el cálculo de emisiones de organizaciones, colectividades territoriales y particulares.

“Constituye una herramienta potente en lo que concierne a las buenas prácticas de compensación de emisiones no reductibles de GEI” (Carbon Clear, 2011) y está orientada a generaciones neutras de carbono por parte de las distintas organizaciones. Actualmente se encuentra en fase de implementación.

IPCC

“El Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC) es el responsable por analizar la ciencia relacionada con el cambio climático a nivel global”. (IPCC, 2000) Los países que ratificaron el protocolo de Kioto se comprometieron a alcanzar metas de forma individual para limitar o reducir sus emisiones de GEI al menos en un cinco por ciento (5%) por debajo de los niveles establecidos en 1990 para el período de 2008 a 2012. (IPCC, 2001)

Las guías de IPCC proporcionan metodologías para estimar los inventarios nacionales de emisiones antropogénicas por fuente y por remociones de GEI. Los límites del sistema a estudiar en los inventarios corresponden a los límites del país y no siguen una aproximación por ciclo de vida.

Las guías del IPCC aconsejan en estimar métodos a tres niveles de detalle:

- Nivel 1, donde se calculan las emisiones directas de la organización.
- Nivel 2, las emisiones indirectas que se relacionan con el consumo de energía
- Nivel 3, todas las emisiones indirectas, relacionadas con los proveedores de materias primas y el uso y fin de vida de los productos generados.

El uso de las guías consiste en especificaciones matemáticas de los métodos, información en factores de emisión u otros parámetros que se usan para generar las estimaciones y recursos de actividad de datos para estimar el nivel total de las emisiones netas.

Las guías internacionales del IPCC representan las referencias más aceptadas formalmente a nivel global para cuantificar las emisiones de GEI para un sistema. De igual forma, existen actualmente bases de datos tales como Eco-invent y herramientas informáticas tipo software (GaBi, Simapro, Umberto) que son herramientas esenciales para la implementación de estudios de LCA y de Huella de Carbono.

En la siguiente tabla se realiza una comparación entre las distintas metodologías aplicables a la medición de huella de carbono en una organización o producto

Tabla 1. Comparación general entre metodologías aplicables a medición de huella de carbono

Metodología	Alcance emisiones	Escala aplicable	GEI considerados	Contabilización	Reducción	Compensación	Otros impactos ambientales distintos a huella de carbono
IPCC	Directas + indirectas	Producto, Organización, Territorio	Todos GEI	SI	SI	SI	SI
GHG Protocol	Directas + indirectas	Producto, Organización, Territorio	6 GEI Kioto	SI	Poco	NO	NO
ISO	Directas + indirectas	Producto, Organización, Territorio	Todos GEI	SI	NO	NO	NO
PAS 2050	Directas + indirectas	Producto	Todos GEI	SI	NO	NO	NO
PAS 2060	Directas + indirectas	Organización, Territorio	Todos GEI	SI	SI	SI	NO

Fuente: *Elaboración propia*

Entre las metodologías presentadas en la tabla 3 para la medición de huella de carbono se tiene que la más antigua es la de IPCC (1996), seguida por ISO (1997) y GHG Protocol en su primera versión (2003), mientras que entre las más recientes se encuentran PAS 2050 (2008) y PAS 2060 (2011). En la tabla 2 se describen algunas de las ventajas que tiene cada una de las metodologías.

Tabla 2. Comparación específica entre metodologías

	IPCC	GHG Protocol	PAS 2050 / 2060	ISO
Metodología Intuitiva	SI	SI	NO	SI
Replicación del análisis	SI	SI	SI	SI
Brinda parámetros para la recolección de datos	SI	NO	NO	NO
Especifica la forma de cálculo para la cuantificación de los GEI	SI	SI	SI	SI
Presenta parámetros para la presentación y comunicación de los datos de GEI	SI	NO	NO	SI
Facilidad para crear escenarios, asumir datos, desarrollar línea base, etc.	SI	SI	SI	SI
Establece comparación con otros productos similares	NO	NO	SI	NO
Evaluación de impactos específicos de productos o servicios	SI	NO	SI	NO
Años de desarrollo y experiencia de aplicación de la metodología	Desarrollada en 1996	Desarrollada en 2003	Desarrollada en 2008	Desarrollada en 1997

Fuente: *Elaboración propia*

- *Metodología intuitiva*, se refiere a si la metodología es de fácil comprensión pues no requiere de estudios específicos previos a su lectura y aplicación.

-
- *Replicación del análisis*, se refiere a la reproducibilidad del análisis, si una vez realizado una primera vez, su replicación no requiere una modificación total al análisis y si puede ser replicado por cualquier persona, una vez se haya realizado la transferencia del conocimiento.
 - *Brinda parámetros para la recolección de datos*, se refiere a si el método brinda guías sobre los parámetros a tener en cuenta para la recolección de datos o formatos establecidos para recopilar los mismos.
 - *Especifica la forma de cálculo para la cuantificación de los GEI*, se refiere a si la metodología presenta lineamientos y especifica la forma en la que se debe realizar el cálculo para la cuantificación de los GEI.
 - *Presenta parámetros para la presentación y comunicación de los datos de GEI*, se refiere a que entrega lineamientos y/o formatos para la presentación y comunicación final de los datos de GEI obtenidos en el análisis.
 - *Facilidad para crear escenarios, asumir datos, línea base, entre otros*, se refiere a si es posible asumir datos que no estén presentes durante el cálculo y qué tan preciso es realizar este tipo de asunciones.
 - *Establece comparación con otros productos similares*, se refiere a comparación en impactos, insumos consumidos, emisiones generadas, entre otros, por productos similares o del mismo tipo.
 - *Evaluación de impactos específicos de productos o servicios*, se refiere a si entregan indicadores finales de impacto. Los que tienen como respuesta **NO** son aquellos que entregan indicadores intermedios como: consumo, vertimientos, emisiones. Aquellos que tienen como respuesta **SI**, a partir de los indicadores intermedios, entregan indicadores finales de impacto.
 - *Años de desarrollo y experiencia de aplicación de la metodología*, se refiere al año en el que fue desarrollada la metodología, dando un tiempo de experiencia a partir de dicha fecha. Se asume que a mayor cantidad de años de experiencia, ha sido posible identificar y desarrollar más casos aplicados con dicha metodología.

Dentro de las metodologías de GHG Protocol, PAS 2050 e ISO no se tiene en cuenta las emisiones generadas por el transporte aéreo. Para la metodología PAS se requiere generar un factor multiplicador para las emisiones de CO₂ de las aeronaves (Such, 2011), para la metodología GHG

Protocol se presenta el uso de un factor de corrección en el inventario de resultados para las emisiones de las aeronaves (GHG Protocol, 2011), así como para la metodología ISO se incluyen las emisiones indirectas de la industria, aunque no se cuenta con criterios específicos sobre las emisiones generadas por las aeronaves (Spannagle, 2006)

En el año 2006, IPCC desarrolló y entregó las “guías para los inventarios de gases de efecto invernadero (*guidelines for the national greenhouse gas inventories*)” con la finalidad de ayudar a los países a recopilar información completa sobre sus GEI. De acuerdo a las guías desarrolladas para la aviación, deben ser incluidas las emisiones por despegues y aterrizajes. Con los lineamientos dados en las guías del IPCC, fue desarrollada la metodología actualmente aplicada por la OACI en su calculadora de huella de carbono para vuelos nacionales e internacionales.

Teniendo en cuenta los criterios que se emplean en cada una de las metodologías descritas anteriormente, sus ventajas y desventajas, para la presente investigación se tomará la metodología de IPCC para el cálculo de huella de carbono de la industria aeronáutica por lo siguiente: es una metodología intuitiva, permite la replicación del análisis, brinda parámetros de recolección de datos, especifica la forma de cálculo para la cuantificación de los GEI, presenta parámetros para la presentación y comunicación de los datos de GEI, permite la creación de escenarios, permite asumir datos, permite la evaluación de impactos específicos de productos o servicios, y presenta la mayor cantidad de años de experiencia como metodología. Al tomar la metodología IPCC, se cuenta ya con valores de Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential – GWP) dados en dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Estos valores se presentan en el Anexo E.

4.7 LA AVIACIÓN Y LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

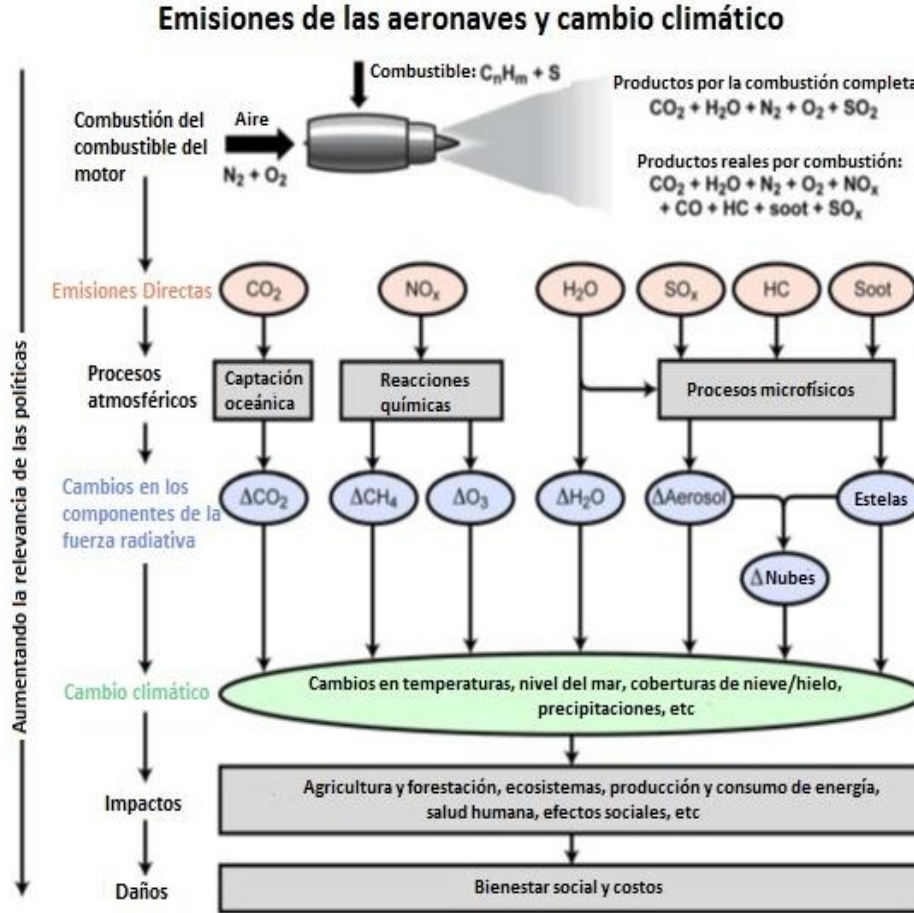
La contribución total de las emisiones de las aeronaves al dióxido de carbono total generado por fuentes antropogénicas se considera del 2% (IPCC, 2000). El crecimiento del tráfico aéreo supone que las emisiones generadas por la industria también crecerán, razón por la cual se han generado eficiencias en el consumo de combustible, prolongación de la vida útil de las aeronaves, mejoras en el rendimiento de las aeronaves, generación de combustibles alternativos, entre otras prácticas más amigables con el ambiente.

En la aviación se tiene varios factores, tanto directos como indirectos, que influyen directamente en la generación de CO₂, aportante principal a la huella de carbono por parte de la industria. Entre los factores indirectos por ejemplo, se cuentan las áreas administrativas de la industria, las instalaciones de mantenimiento, los vehículos de transporte terrestre utilizados dentro de los aeropuertos, servicios adicionales a la aviación en los aeropuertos (tiendas, restaurantes, casas de cambio), entre otros. Como factor directo principal en la generación de CO₂, con el cual se calcula la huella de carbono en la aviación se cuenta principalmente la cantidad de combustible consumido por las aeronaves. La cantidad de consumo de combustible está dada por la cantidad de energía total necesaria para el vuelo y por la eficiencia con la cual el combustible es transformado en dicha energía. La intensidad con la cual se quema el combustible fósil, sumado con el consumo de combustible registrado por la aeronave, determinan la cantidad total de emisiones de CO₂.

Los efectos de las emisiones de las aeronaves a grandes altitudes, especialmente las emisiones referentes a óxidos de nitrógeno (NO_x), vapor de agua y de dióxido de carbono (CO₂), son de particular preocupación por sus impactos en el medio ambiente.

En la Figura 5 se muestran las emisiones principales provenientes de la combustión generada por los motores de las aeronaves, así como su impacto en el cambio climático.

Figura 5. Emisiones de las aeronaves y su relación con el cambio climático

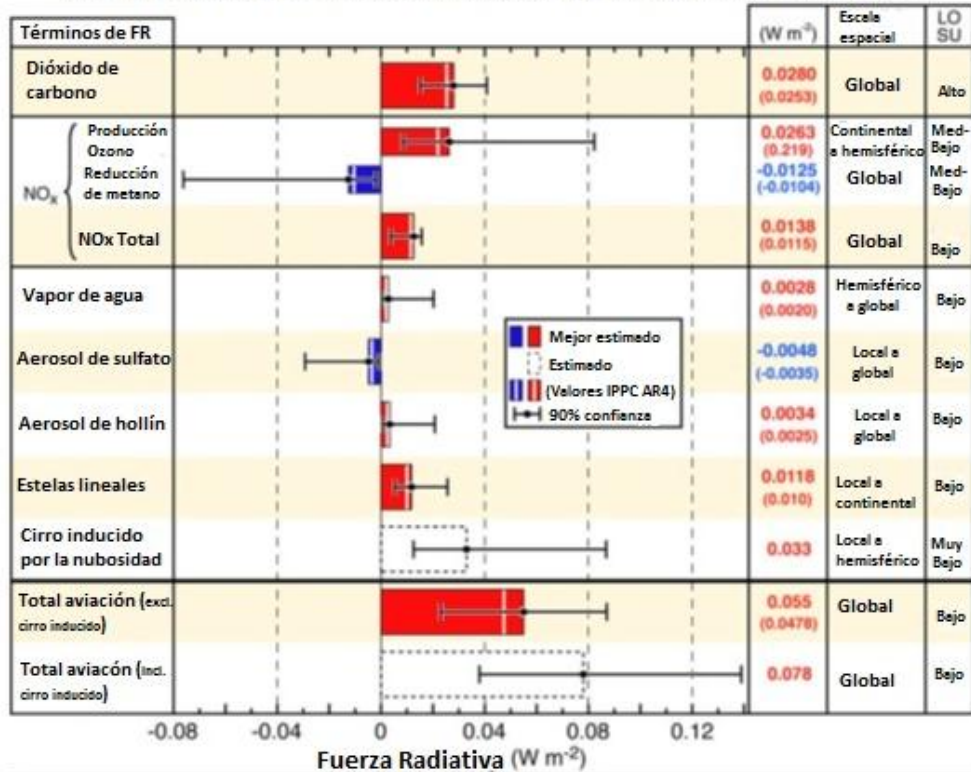


Fuente: Traducido de IPCC, 1999

Según Lee, y otros (2008) “La cuantificación de las emisiones en la aviación se ve afectada por la dificultad en la formulación de factores de GWP respecto a las emisiones de NO_x”. Sin embargo, al revisar los componentes tomados en cuenta para el cálculo de las emisiones producidas por la aviación, se encuentra que las más importantes son las de CO₂, lo cual se muestra en la Figura 6 a continuación. En esta figura se muestra una relación del CO₂ con otras emisiones, empleando la escala a la cual se ubican las mismas y el Nivel de Entendimiento Científico (Level Of Scientific Understanding - LOSU) que se tiene de las emisiones.

Figura 6. Emisiones de las aeronaves y su relación con el cambio climático

Componentes de la Fuerza Radiativa en la Aviación en 2005



Fuente: Lee, y otros, 2008

En la industria aeronáutica se identifican algunas fuentes de emisión de CO₂ que se consideran como las más críticas, entre las cuales se destacan: ciertas etapas de vuelo de las aeronaves (carreteo, despegue y aterrizaje) (Romano, Gaudio, & De Lauretis, 1997), falta de eficiencia en el tráfico de las aeronaves (enrutamiento, demoras, congestión en los aeropuertos, etc.) (Lee, y otros, 2008), equipos viejos (ICAO, 2008).

Así también, existen otros factores que afectan la cantidad de energía total requerida para realizar un vuelo: aerodinámica y peso de la aeronave, tiempo de vuelo y altitud a la que está programado, condiciones atmosféricas en la ruta (vientos de cola, vientos cruzados, temperatura del ambiente y condiciones meteorológicas del aeródromo, entre otros) y el tiempo empleado en cada una de las etapas del vuelo (IPCC, 1996)

El impacto de la industria aeronáutica del tipo subsónico, de acuerdo a los estudios y conocimiento actual, están dados en términos de fuerza radiativa (Radiative Forcing – RF). La fuerza radiativa es una medida de la influencia que un factor ejerce en la modificación del equilibrio entre la energía entrante y saliente en el sistema Tierra – Atmósfera. Un forzamiento positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento (Fuglestedt, y otros, 2009). A continuación se presentan los impactos mayores sobre el medio ambiente, en términos de fuerza radiativa, de acuerdo con la literatura:

- Emisiones de CO₂ resultan en RF positivo (calentamiento) (Hansen, y otros, 2005)
- Emisiones de NO_x resultan en la formación de O₃ troposférico por conjugación química atmosférica, con un RF positivos (calentamiento) (Forster, Shine, & Stuber, 2007)
- Emisiones de NO_x resultan en la destrucción del metano (CH₄) en el ambiente, resultando en un RF negativo (enfriamiento), acompañado de una pérdida troposférica de O₃. (Wild, Prather, & Akimoto, 2001)
- Emisiones of partículas de sulfato provenientes del sulfato presente en los combustibles producen un RF negativo directo (enfriamiento) (Penner, Chen, & Wang, 2009)
- Emisiones de partículas hollín resulta en RF positivo directo (calentamiento) (Jensen & Toon, 1997)
- La formación de las estelas de vapor resultan en un efecto RF positivo (calentamiento) (Stuber & Forster, 2007)

La mayoría de las emisiones de gases y partículas relacionadas a la industria aeronáutica están dadas por la combustión del keroseno con aire del ambiente en la cámara de combustión del motor. Algunas emisiones tienen su origen en el aceite (Dakhel, Lukachko, Waitz, Miake-Lye, & Brown, 2005) y en la erosión de las partes de metal (Petzold, 1998), así como de las pequeñas partículas de metal que podrían estar presentes en el combustible (Lewis, y otros, 1999).

El combustible más empleado en la aviación civil es el keroseno, en sus diversas presentaciones: Jet A1, Jet Fuel, JP1, JP5, JP8, entre otros, siendo el Jet A1 el más empleado por sus características de combustión y alto grado de congelamiento (-47°C). De la combustión del keroseno se genera principalmente CO₂ y H₂O, gases relevantes como GEI (Spicer, Holdren, Riggan, & Lyon, 1994) . Las emisiones generadas por la combustión de 224 Tera gramos de keroseno en un año se muestran en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Emisiones generadas por la combustión de Keroseno

Fuente	Tasa de Emisión (2004) en Tg yr ⁻¹
CO ₂	700
H ₂ O	275
NO _x	3
Hollín	0.006
SO ₂	0.18
CO	0.67
HC	0.09

Fuente: Adaptado de Lee, y otros, 2009

Las emisiones de monóxido de carbono (CO) y de Hidrocarburos (HC) son usualmente el resultado de una combustión incompleta, por lo cual sus índices de emisión son mayores de lo habitual.

La potencia empleada de los motores en cada una de las etapas de vuelo son 100% en despegue, 80% en ascenso, 30% en descenso y 7% en taxeo. Durante los ciclos de despegue y aterrizaje (Landing and Take Off – LTO) tiene lugar aproximadamente el 56% de las emisiones de la aviación comercial. Durante la etapa del crucero las emisiones de CO₂ constituyen el 6% del flujo másico total proveniente del motor.

Como antecedente inmediato al presente estudio de estudio de la huella de carbono en la aviación colombiana se tiene que durante los 65 años de historia de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) se ha trabajado a nivel mundial para crear normativas con distintos énfasis en la aviación. Para reducir los niveles de contaminación producidos por la aviación, nace una propuesta por parte de la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA), la cual apunta a la reducción de las emisiones de GEI, con una proyección hacia 2050. Dentro de los aspectos más importantes de la propuesta se encuentran tres puntos clave en los cuales la IATA se enfocará para mitigar la cantidad de GEI producidos: 1. Una mayor eficiencia en el uso de los combustibles hasta 2020, 2. Emisiones con crecimiento neutro a partir de 2020 y 3. Una reducción neta de emisiones para 2050 en comparación con 2005. Dicho compromiso fue presentado por la IATA a

través de su Director General y Chief Executive Officer (CEO), Giovanni Bisignani, en Copenhague ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC).

La propuesta presentada también apuntó a que, para la reunión de COP-16, se tuviera un Planteamiento Global Sectorial que permita ofrecer resultados reales frente a objetivos concretos. Se planteó una solución viable para la mitigación de ruidos de las aeronaves, incluido en la *Primera Parte del Anexo 16* de la OACI. En lo referente a las emisiones de los motores de las aeronaves se cuenta con la *Segunda Parte del Anexo 16* de la OACI. Básicamente las estrategias propuestas por la aviación para disminuir el impacto de la industria sin caer en niveles de pérdidas para la misma, se enfocan en cuatro pilares de cambio: Inversión en nuevas tecnologías, forma más inteligente de volar, construcción de infraestructura eficiente y obtención de ventajas económicas positivas (IATA, 2009).

Se recalcó además, que la reducción de emisiones no solamente debe enfocarse a la mejora en rendimiento de las aeronaves, motores y combustibles, sino también a cómo ubicar los residuos que se seguirán emitiendo hasta cuando se complete la reducción total planteada por la ICAO en 2050. Por ello, las Naciones Unidas a través de su Convención de Cambio Climático, presentan varias alternativas para el manejo de las emisiones de acuerdo con los responsables de las mismas (ICAO, 2004). Dichas ideas se presentaron como propuesta para la aviación después de la cumbre de Kioto, por parte del Cuerpo Subsidiario para Consejería Tecnológica y Científica (Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice – SBSTA), y están determinadas a ser parte de los acuerdos ecológicos internacionales. Dichas propuestas dadas por las Naciones Unidas (UNFCCC - SBSTA, 1996) se presentan en el Anexo C

La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ a nivel global y el poco conocimiento científico respecto a la medición del impacto climático, han hecho que se creen varios métodos o estrategias a fin de cuantificarlas (Bows, Anderson, & Wood, 2010). Por ejemplo, en Europa se ha implementado varias estrategias para la medición del índice de huella de carbono (*Ibidem*) Una de las primeras categorizaciones está dada a nivel regional, y se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$E_R = \frac{S_R}{S_N} \times E_N,$$

en donde se tiene que E_R es la Emisión Regional; S_R es la Estadística Regional; S_N es la Estadística Nacional y E_N es la Emisión Nacional (Balsano, 1998). Éste método asume que hay una distribución uniforme de las emisiones en el sector en el que se desea realizar la medición (*Ibidem*). Para estimar mediciones locales se puede utilizar la cantidad de combustible empleado y multiplicarlo por un factor de emisión relacionado al contenido carbónico del combustible.

De acuerdo con el Instituto Europeo de Acreditación de Carbono de los Aeropuertos (*Airport Carbon Accreditation*) (2009), se deben cumplir con cuatro etapas, cuando se trata de realizar una reducción en las emisiones de carbono de un aeropuerto:

- ✓ Cartografía (Mapping) – Para medir la huella de carbono
- ✓ Reducción (Reduction) – La administración del carbono para alcanzar la reducción de huella de carbono
- ✓ Optimización (Optimisation) – Compromiso en la reducción de huella de carbono.
- ✓ Neutralidad (Neutrality) – Neutralidad del carbono para las emisiones directas por compensación

Para facilitar la toma de muestras y el estudio de la huella de carbono, otros estudios llevados a cabo dividen las emisiones en dos procesos de producción: una llevada a cabo durante las etapas de despegue y de aterrizaje (landing and take-off – LTO) y otra llevada a cabo para la altitud de crucero (cruise) (ICAO, 2004). Se presentan varios estudios realizados en Europa dentro de la aviación para la medición de huella de carbono en el anexo D.

En la actualidad, la regulación colombiana del medio ambiente, en la parte referente a la aviación, no manifiesta ninguna ley referente al manejo de las emisiones de la aviación o de la compensación que las empresas aeronáuticas deban cumplir. Por este motivo, no se han cuantificado las emisiones reales referentes a la industria aeronáutica, reportándose actualmente ningún estudio de huella de carbono en la aviación colombiana.

5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Como resultado de la creciente conciencia y preocupación ambiental, diferentes industrias han tomado un interés particular en analizar el impacto ambiental de sus actividades. A partir de allí,

se desarrolla un interés común en “*volver los procesos y productos menos dañinos para el medio ambiente, volviéndolos productos y servicios más verdes*”. (EEA, 2007) Con el fin de evaluar el impacto ambiental de un producto o servicio, las compañías han buscado formas de direccionar el problema desde un punto de vista holístico, sistemático y financiero. Una de las herramientas que surge como una posible respuesta a este problema es el Análisis de Ciclo de Vida – ACV (Life Cycle Assessment – LCA). El ACV considera las implicaciones de las acciones empleadas para la creación de un producto o un servicio, en un período de vida denominado de la cuna a la tumba (cradle-to-grave (Carbon Trust UK, 2008)). Los productos y servicios interactúan con el medio ambiente durante cada fase del ciclo de vida (extracción, procesamiento de materia prima, fabricación, transporte, distribución, uso, reutilización, reciclaje y manejo de desperdicios) (SAIC, 2006). Básicamente el ACV consiste en una herramienta de administración ambiental que cuantifica el impacto ambiental (incluye todas las emisiones y factores de degradación del medio ambiente) de un producto a través del ciclo de vida completo del producto, actividad o proceso.

5.1 DEFINICIÓN DE META Y ALCANCE

La meta principal de un ACV es fomentar el análisis del impacto ambiental, ayudando a encontrar mejoras en los sistemas y disminuyendo el impacto ambiental del producto o servicio. Al definir la meta y el alcance se deben considerar todos los límites del sistema, así como los materiales involucrados en el ACV del producto.

La definición del alcance requiere la especificación de las funciones llevadas a cabo por el producto o servicio a analizar, lo cual implica la definición de la unidad funcional.

5.2 UNIDAD FUNCIONAL

La unidad funcional nace de la necesidad de cuantificar el desempeño del producto. De esta forma, al tener una medida del funcionamiento del producto, la unidad funcional representa la referencia para llevar a cabo el análisis, teniendo entonces las entradas y salidas del sistema aplicadas a dicha unidad funcional. La unidad funcional debe ser medible y tener en cuenta la eficiencia y el rango de vida del producto en cuestión (Guinée, y otros, 2002).

5.3 INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

En el inventario del ciclo de vida constituye el núcleo del ACV, es la fase que ocupa el mayor tiempo en el estudio. (Frischknecht, Jungbluth, & et al, 2003) En esta fase se recolectan y procesan los distintos datos del sistema bajo análisis, entre los cuales se encuentran: la energía, materias

primas y otras entradas físicas, productos, co-productos, desperdicios, emisiones al aire, agua y suelo, además de otros aspectos ambientales (SAIC, 2006). Para el estudio de huella de carbono se tienen en cuenta los datos relevantes a cada una de las etapas del ciclo y las emisiones al aire de gases de efecto invernadero.

5.4 HUELLA DE CARBONO

En el presente estudio se desarrollará un análisis de impacto ambiental mediante el cálculo de huella de carbono con enfoque de ciclo de vida. La medición de *huella de carbono* con enfoque de ciclo de vida es un ACV simplificado, pues tiene en cuenta las emisiones de GEI y entrega los resultados en unidades de masa (g, kg, ton, etc.) de CO₂ equivalente (CO₂e ó CO₂eq). Para la medición de huella de carbono se tienen los siguientes alcances:

- Alcance 1, que incluye las emisiones directas pertenecientes a fuentes controladas por la organización.
- Alcance 2, que incluye las emisiones indirecta que ocurren fuera de la organización, a partir de recursos externos importados, como la electricidad, vapor o calor.
- Alcance 3, que incluye las emisiones indirectas expandidas que ocurren fuera de la organización a partir de fuentes no pertenecientes o controladas por la misma, pero que están ligadas a sus actividades.

6. ANÁLISIS DE HUELLA DE CARBONO CON ENFOQUE DE CICLO DE VIDA APLICADO A LA AVIACIÓN

Una vez se han establecido las definiciones, principios y metodología del análisis de ciclo de vida en el capítulo anterior, se procede a analizar el ciclo de vida aplicado al caso de estudio. Para el presente estudio se empleará el análisis de *huella de carbono* con enfoque de ciclo de vida, como análisis de ciclo de vida simplificado, definido como la medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero producidos por las actividades humanas (individuales, colectivas, eventuales y de los productos) en el medio ambiente (Schneider & Samaniego, 2010).

6.1 META

El presente estudio tiene como meta evaluar la información ambiental de dos aeronaves turboreactores tomadas como caso de estudio (Airbus A320 y Boeing B727), identificar mejoras potenciales a los diferentes procesos del ciclo de vida de la operación de las mismas y realizar una comparación entre las mismas.

6.2 ALCANCE Y LÍMITES

Entre las distintas investigaciones a varios sectores industriales se han identificado ciertas fuentes de emisión. Xavier Oh en su libro “*Greenhouse gas management at airports*” identifica las fuentes de emisiones para la industria aeronáutica y las clasifican como:

- Alcance 1: todas las emisiones de GEI que pueden ser controladas por el operador
- Alcance 2: emisiones de GEI generadas por la electricidad utilizada por el operador
- Alcance 3: emisiones de GEI generadas por factores externos que el operador no controla, tales como aeropuertos, transporte en tierra, entre otros.

Utilizando como base el estudio de Oh (2010), se presentan a continuación las emisiones principales generadas por la industria, de acuerdo a cada uno de los alcances:

Tabla 4. Emisiones por alcance de acuerdo a la fuente

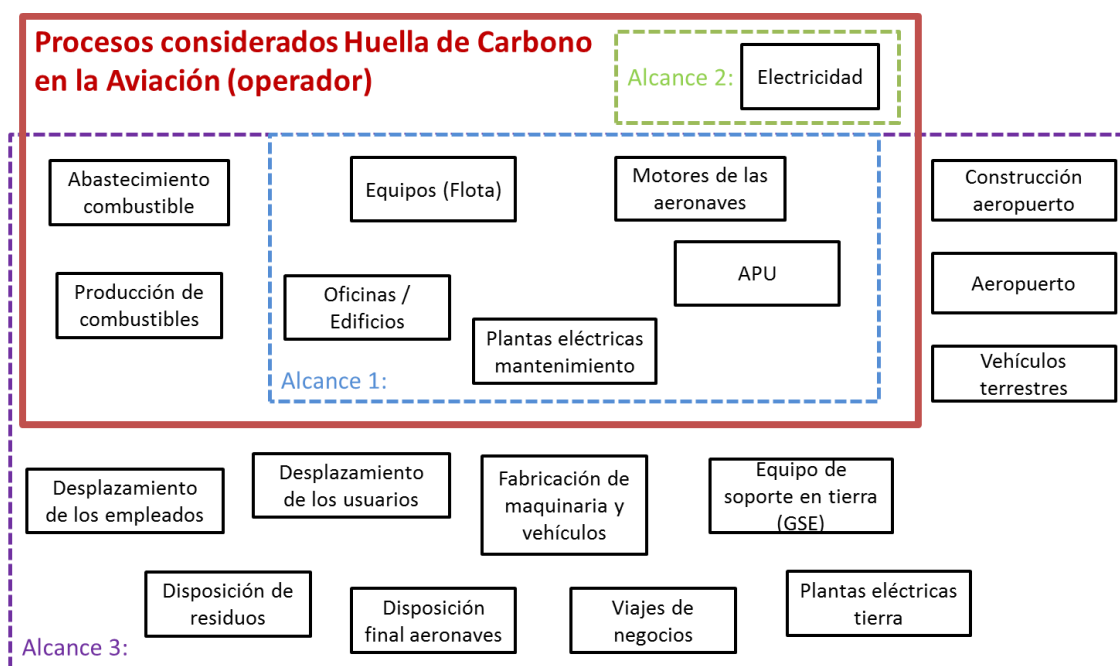
Fuente	Descripción
Alcance 1: Fuentes controladas por el operador	
Equipos de la flota	Aeronaves que son propiedad (o rentados) para el transporte de personas o carga.
Motores principales de las aeronaves ²	Uso de los motores durante las etapas de Despegue y aterrizaje, así como en el carreteo.
APU	Unidad de Energía Auxiliar de las aeronaves
Mantenimiento de las aeronaves	Actividades para el mantenimiento de la aeronave.
Plantas eléctricas	Plantas empleadas para el mantenimiento de las aeronaves
Alcance 2: Generación de electricidad fuera de la organización	
Generación de electricidad (calefacción y aire acondicionado)	Emisiones generadas por la compra de electricidad fuera de la organización
Alcance 3: Otras actividades y fuentes relacionadas con la operación de aeronaves	
Plantas eléctricas	Plantas utilizadas por aeropuertos para generación de electricidad
Equipo de soporte en tierra (GSE)	Equipo empleado en tierra para manejo y servicios a la aeronave
Fuente de energía de emergencia	Generadores que funcionan con diesel para generar energía en tierra
Bomberos	Equipos de prevención en tierra

Vehículos en tierra	Vehículos operados por aerolíneas, aeropuertos y otros terceros
Construcción	Actividades de construcción de las instalaciones de mantenimiento y de aeropuerto
Mantenimiento del aeropuerto	Actividades para mantenimiento de los aeropuertos
Viajes corporativos	Vuelos tomados por directivos de la compañía, que no son realizados en su flota.

Fuente: Adaptado de Oh, 2010

Para el presente estudio de huella de carbono de la aviación en Colombia, se considerarán las emisiones relacionadas con los procesos que se mencionan dentro de los alcances en la figura 7.

Figura 7. Alcances considerados para el presente estudio



Fuente: Elaboración propia

Para el presente estudio se tomó en cuenta el consumo de combustible de una aeronave determinada durante sus distintas operaciones en el territorio colombiano, teniendo como base la ciudad de Bogotá (salidas y llegadas), con la finalidad de realizar una medición de los GEI generados durante el trayecto y compararlo con las emisiones de una segunda aeronave en el mismo trayecto. Se incluye también el consumo eléctrico de los equipos en tierra y las

instalaciones para el mantenimiento de la aeronave, así como el transporte de los combustibles hacia la aeronave.

6.3 UNIDAD FUNCIONAL

Para el presente estudio se realizó un análisis holístico con enfoque de ciclo de vida aplicado a un vuelo de una aeronave por día. Se definió como unidad funcional del estudio las emisiones de CO₂ relacionadas al transporte de un pasajero (g CO₂e pasajero) en una distancia de un kilómetro (**g CO₂ pasajero.km**), aplicado en vuelo de una aeronave por día.

6.4 ETAPAS CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO DE HUELLA DE CARBONO

Se consideraron las siguientes fases:

- *Pre-vuelo.* Donde se consideran las emisiones correspondientes a las maniobras en tierra (encendido del motor y carreteo) y las etapas bajas del vuelo (despegue y ascenso)
- *Vuelo.* Se consideran las emisiones generadas por el consumo de combustible en la etapa de crucero de la aeronave.
- *Pos-vuelo.* Se consideran las emisiones correspondientes a las maniobras relacionadas con las etapas bajas del vuelo (aproximación y aterrizaje), así como las maniobras en tierra (carreteo y apagado del motor)
- *Aeronave.* Se consideran las emisiones correspondientes al mantenimiento de la aeronave, incluyendo la energía eléctrica empleada por las instalaciones y equipos, así como las emisiones generadas por la fabricación de la aeronave.

6.5 INVENTARIO DE HUELLA DE CARBONO

Para cada una de las fases de la unidad funcional se tomaron en cuenta las siguientes entradas y salidas:

Tabla 5. Emisiones por alcance de acuerdo a la fuente

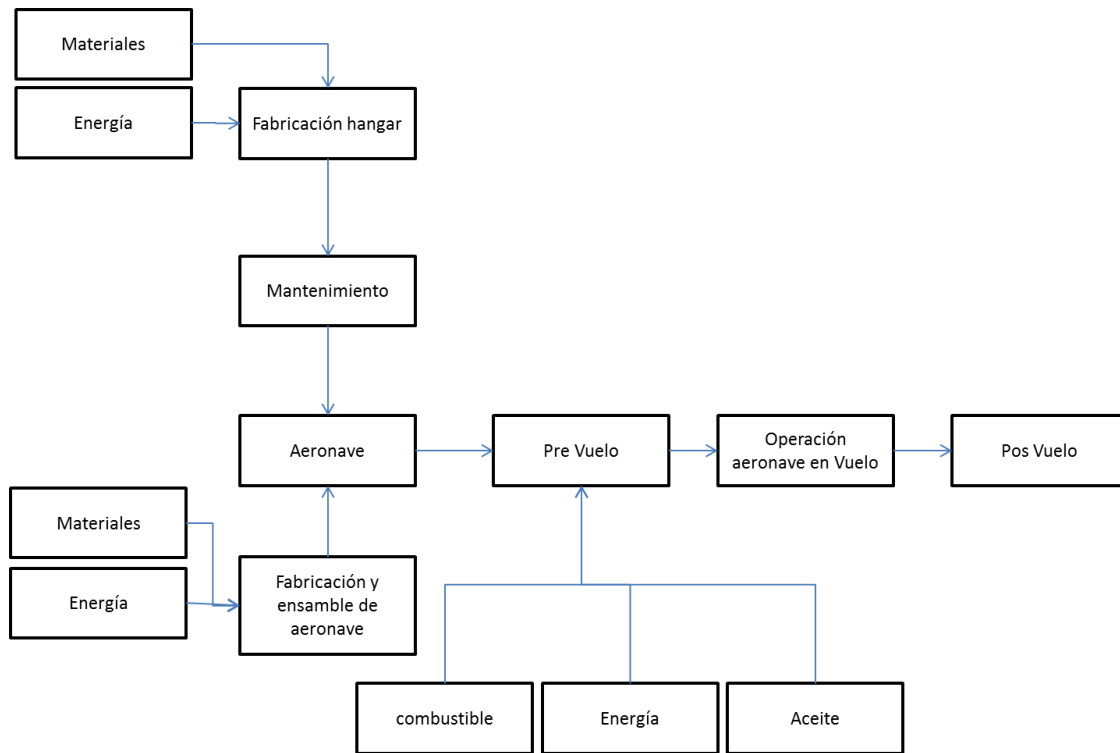
Entradas	Salidas
Consumo combustible ACPM	Emisiones dadas en términos de CO ₂ e
Consumo combustible Keroseno	Emisiones dadas en términos de CO ₂ e
Consumo energético equipos en tierra	Emisiones dadas en términos de CO ₂ e por kWh

Fuente: Elaboración propia

6.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO

El diagrama de flujo simplificado de análisis de huella de carbono de las aeronaves tenido en cuenta para el presente estudio se muestra en la Figura 8 a continuación, con el objetivo de simplemente ilustrar las diferentes etapas tomadas en cuenta.

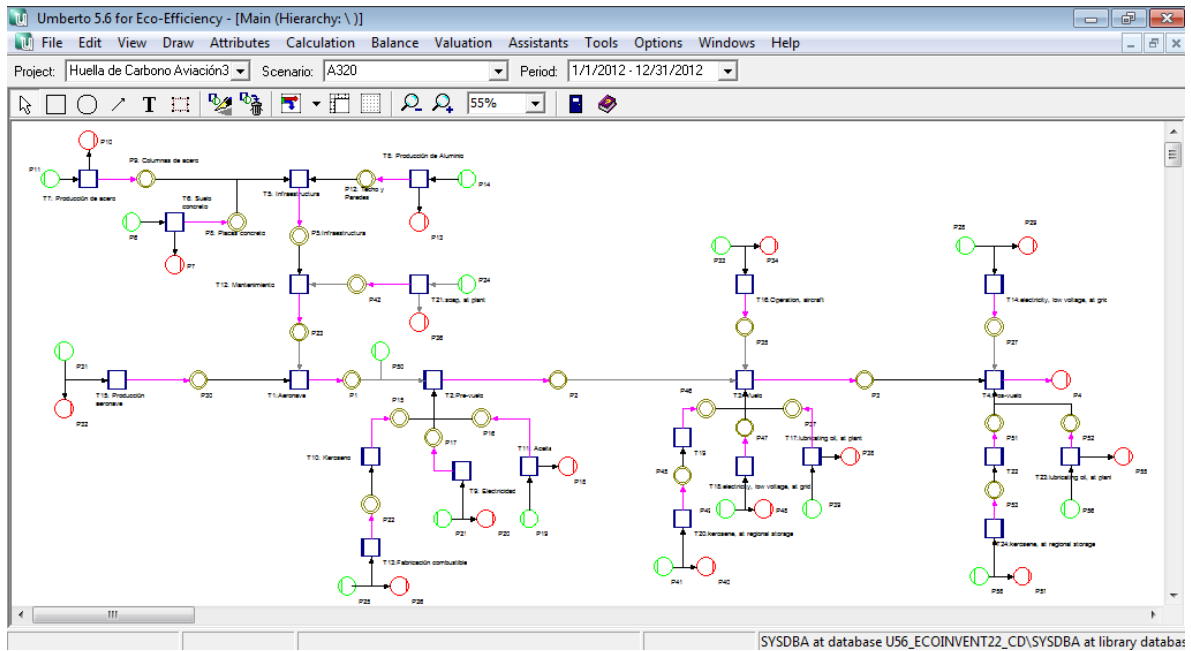
Figura 8. Diagrama de flujo simplificado



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9 se muestran las entradas y salidas que se tomaron en cuenta para cada una de las etapas del análisis de huella de carbono, de forma explícita se muestra cada etapa bajo análisis en el capítulo “Impactos ambientales y alternativas de reducción”.

Figura 9. Diagrama de flujo con entradas y salidas por proceso



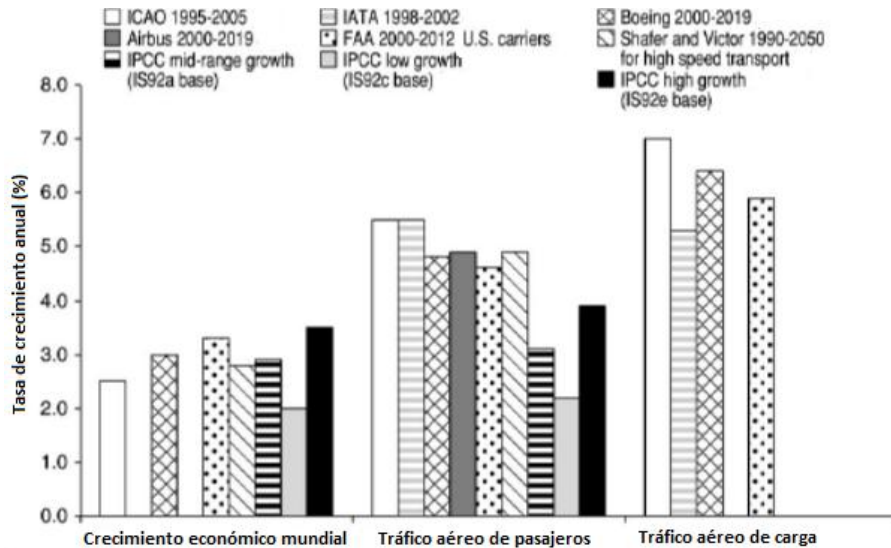
Fuente: El autor mediante el uso del softawer Umberto®, 2012

7. IMPACTOS AMBIENTALES Y ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN

7.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la ICAO, se estima que entre 2005 y 2025 el tráfico aéreo internacional crecerá en un 5.3% anual, mientras que el tráfico doméstico aumentará con una tasa anual de 3.4%. (International Transport Forum, 2009) De igual forma se estima que el aumento de las emisiones de CO₂ será un poco menor debido a la mejora en la eficiencia de los combustibles, mejoras considerables en los diseños de las aeronaves, una adecuada administración del tráfico aéreo y medidas adecuadas de operación de las aeronaves (ICAO, 2011)

Figura 10. Crecimiento económico y crecimiento de tráfico aéreo



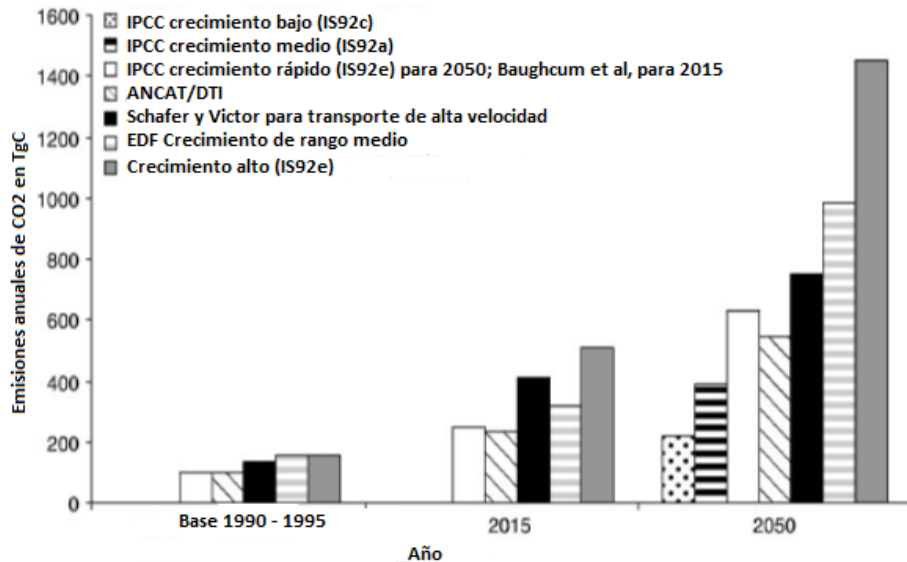
Fuente: Adaptado de International Transport Forum, 2009

Debido a que la mayoría de las emisiones de las aeronaves se “inyectan” directamente en la tropósfera superior y en estratósfera inferior (entre los 9 y 13 kilómetros de altitud), los efectos que estos tienen sobre el medio ambiente son significativos, puesto que *“los impactos de la quema de combustible fósil en la altura es aproximadamente el doble de los impactos generados por quemar el mismo combustible en el suelo”* (GIACC, 2009).

De las emisiones generadas por el motor de las aeronaves debido a la quema del combustible fósil, desgaste de las partes, quema de aceite y demás procesos, entre el 7% y 8% son emisiones de CO₂ y H₂O, un 0.5% está compuesto por emisiones de NO_x, HC, CO, SO_x y otras emisiones químicas y

partículas de hollín. El 91.5% a 92.5% restante está compuesto por emisiones de oxígeno (O₂) y Nitrógeno (N₂) (Allaire & Willcox, 2010). En la figura 9 se presenta la proyección de crecimiento de emisiones de CO₂ a 2015 y 2050, de acuerdo a varias investigaciones realizadas referentes al tema.

Figura 11. Crecimiento de emisiones de CO₂ a 2015 y 2050.



Fuente: Adaptado de GIACC, 2009

De acuerdo con la literatura, los impactos que tienen las distintas emisiones están dados principalmente como:

- Alteraciones directas a la composición química de la tropósfera y estratósfera.
- Cambios en el nivel de partículas del aire
- Creación de estelas de vapor de agua que pueden mutar en nubes cirros (nubes compuestas por cristales de hielo condensadas, caracterizadas por bandas delgadas y finas) (*Ibidem*)

7.2 CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO

Las emisiones generadas en cada una de las etapas del ciclo de vida se presentan en este subcapítulo. Se tuvo en cuenta para cada una de las etapas las entradas y distintos procesos seleccionados en el capítulo 6 “Análisis de huella de carbono con enfoque de ciclo de vida, aplicado a la aviación”. Los resultados, considerados una parte importante del análisis de ciclo de vida,

fueron obtenidos empleando las herramientas computacionales Microsoft Excel® y Umberto®, con el fin de facilitar el cálculo de las emisiones.

En la tabla a continuación se presentan las especificaciones técnicas de cada aeronave, para realizar un comparativo aplicado a la medición de huella de carbono. Las características generales que se definen para la aeronave comprenden: número de motores, peso máximo de despegue, cantidad máxima de combustible, peso vacío, cantidad de pasajeros, rango, techo operacional, velocidad de crucero, dimensiones generales, año de introducción al mercado y costos.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de las aeronaves Airbus A320 y Boeing B727

	Airbus A320	Boeing B727
Año introducción servicio	1988	1964
Tripulación	2	3
Pasajeros	150	189
Número de motores	2	3
Longitud (m)	37,57	46,69
Altura (m)	11,76	10,36
Envergadura (m)	34,1	32,91
Peso vacío (kg)	42.600	46.675
Peso máximo despegue (kg)	78.000	95.028
Rango (km)	5.900	4.500
Techo operacional (m)	12.000	12.802
Velocidad de crucero (km/h)	828	907
Cantidad máxima combustible (litros)	24.210	39.823
Costo (USD)	88'300.000 (2011)	11'900.000 (2011)
Consumo promedio combustible por hora de vuelo (kg/h)	4.982,27	11.690

Fuente: Airbus, 2012 y Boeing, 2012

Tabla 7. Mantenimientos de las aeronaves dado en horas.

Tipo de mantenimiento	B727	A320
Revisión de rutina corta	548	548
Revisión de rutina media	219	274
Servicio tipo A	292	146
Servicio tipo C	0	0
Total horas en mantenimiento	1059	967
Porcentaje de ocupación anual del hangar	12.09%	11.04%

Fuente: Elaboración propia con datos de distintas empresas aeronáuticas.

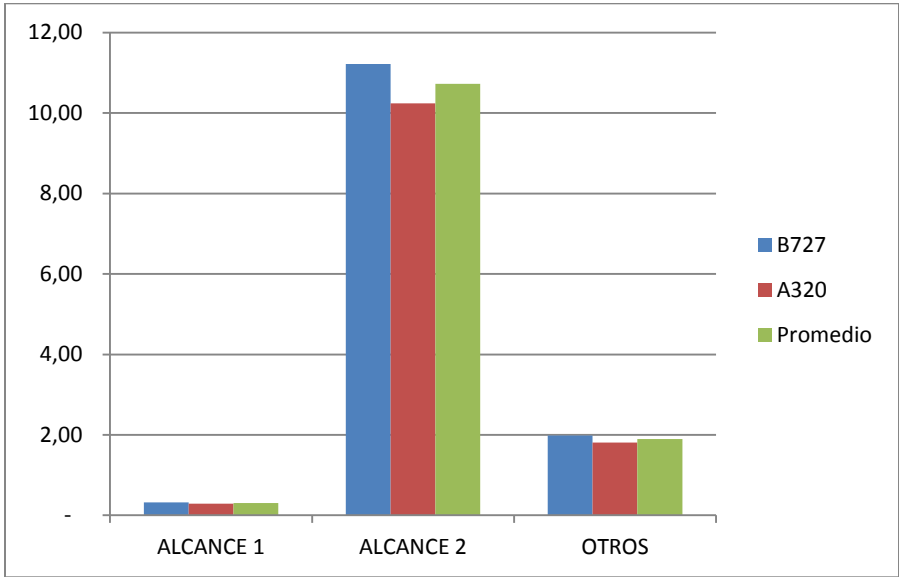
Para el presente caso de estudio no se considerarán los servicios tipo C como parte del mismo puesto que no se alcanza a realizar un mantenimiento de este tipo durante el período de un año. Tiendo en cuenta lo anterior, se encuentra que el porcentaje de ocupación anual de los hangares para un mantenimiento de una de las aeronaves empleadas en el presente estudio es de 12.09% para Boeing B727 y de 11.04% para Airbus A320.

De acuerdo con los cálculos realizados por el autor, a partir de los datos provistos por la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil, se encontró que la duración promedio de un vuelo dentro del territorio colombiano es de 55 minutos con 33 segundos, al igual que la distancia promedio fue calculada en 679.68 kilómetros. Considerando las distancias y tiempos promedio de vuelo en el territorio colombiano se asume que se tratan de una hora de vuelo por cada vuelo diario realizado.

Las emisiones de CO₂e relacionadas al mantenimiento de la aeronave, para una unidad de un vuelo por día en 2011, fueron en promedio de 12.93 g CO₂e, siendo el alcance 2, que se refiere a la electricidad empleada por los equipos, el de mayor aporte a la huella de carbono con 10.73 g CO₂e. En segundo lugar se cuenta las emisiones generadas por otros, que se refiere al combustible consumido por los equipos para abastecimiento y equipos de mantenimiento, con 1.90 gCO₂e. Finalmente está el alcance 1, que se refiere a plantas eléctricas empleadas en el mantenimiento, con 0.31 gCO₂e. De igual forma para se calcularon las emisiones en los distintos alcances para cada una de las aeronaves. Para Airbus se encontró emisiones totales de 12.34 gCO₂e, siendo 10.24 gCO₂e del alcance 2, 1.81 gCO₂e de otros y 0.29 gCO₂e de alcance 1. Para Boeing B727 se encontró

que las emisiones totales fueron de 13.51 gCO₂e, siendo 11.22 gCO₂e en alcance 2, 1.98 gCO₂e en otros y 0.32 gCO₂e en alcance 1.

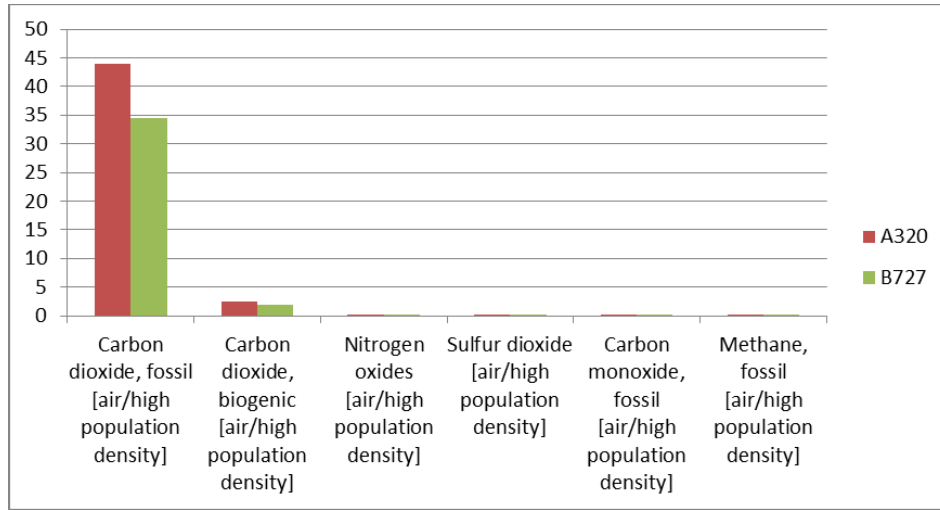
Figura 13. Emisiones CO₂e etapa Aeronave por proceso de mantenimiento



Fuente: El autor, 2012

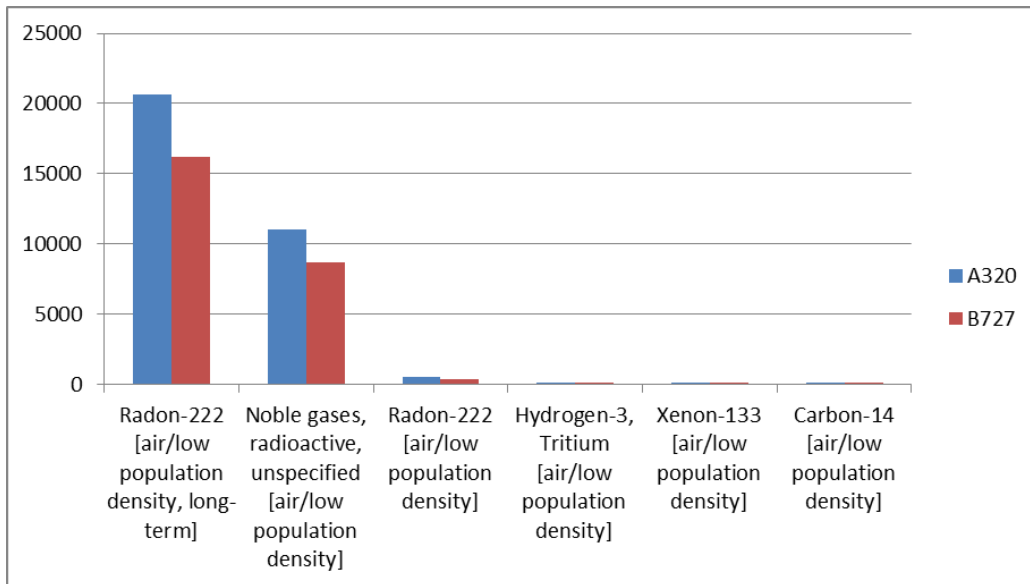
Para la creación de la aeronave y del hangar en el mantenimiento, se encontró que las emisiones provenientes de los distintos procesos de extracción, fabricación y construcción se clasificaron en emisiones al aire en Kilogramos de CO₂e (Figura 14), emisiones por radiactividad en kilo Bequerels (Figura 15) y emisiones energéticas dadas en Mega Jules (Figura 16). Estos datos se encuentran en el Anexo F. Las diferencias entre las emisiones de las dos aeronaves en el proceso de producción están dadas por la cantidad de vuelos registrados durante un año en el territorio colombiano, asignadas a la vida útil de la aeronave y empleando un vuelo día como unidad funcional. La aeronave Boeing B727, con 948 vuelos promedio en un año, emite menos CO₂ asignada a un vuelo por la producción de la aeronave, mientras que la aeronave Airbus A320, con 744 vuelos promedio en un año, emite mayor cantidad de CO₂ asignada a un vuelo la producción de la aeronave. De igual forma las emisiones de radioactividad dadas en Bequerels, así como las emisiones de vapor al aire dado en unidades de energía Mega Joules, indican que la aeronave B727 tiene un impacto mayor que la aeronave A320, pero esto se debe al factor explicado anteriormente de la cantidad de vuelos asignados para cada una de las aeronaves.

Figura 14. Emisiones en Kg de CO₂e de los procesos de construcción de la aeronave y el hangar



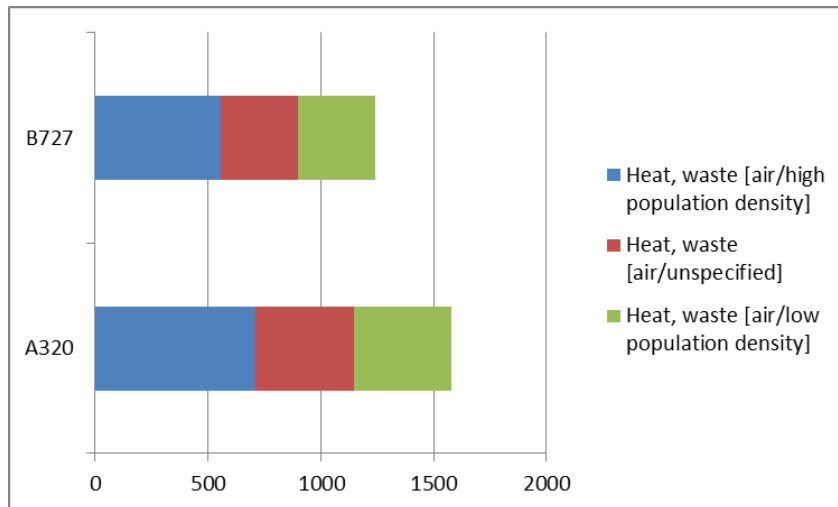
Fuente: El autor, 2012

Figura 15. Emisiones de radioactividad en kBq



Fuente: El autor, 2012

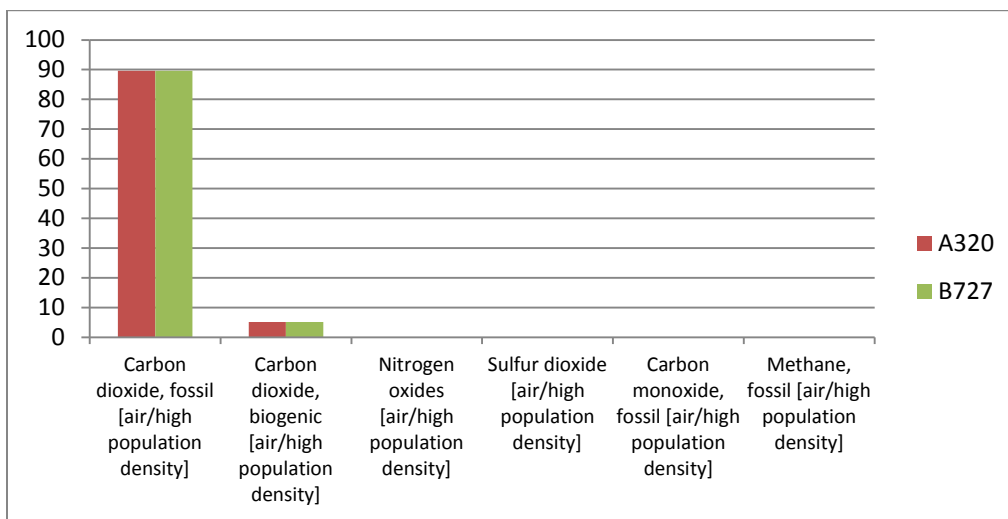
Figura 16. Emisiones de vapor al aire en MJ



Fuente: El autor, 2012

Asumiendo que las aeronaves realizan el mismo número de vuelos en el año se presenta la siguiente figura, comparando ambas aeronaves a un promedio de 1 vuelo realizados en un día.

Figura 17. Emisiones en Kg de CO₂e de los procesos de construcción de la aeronave y el hangar para un mismo número de vuelos de ambas aeronaves.

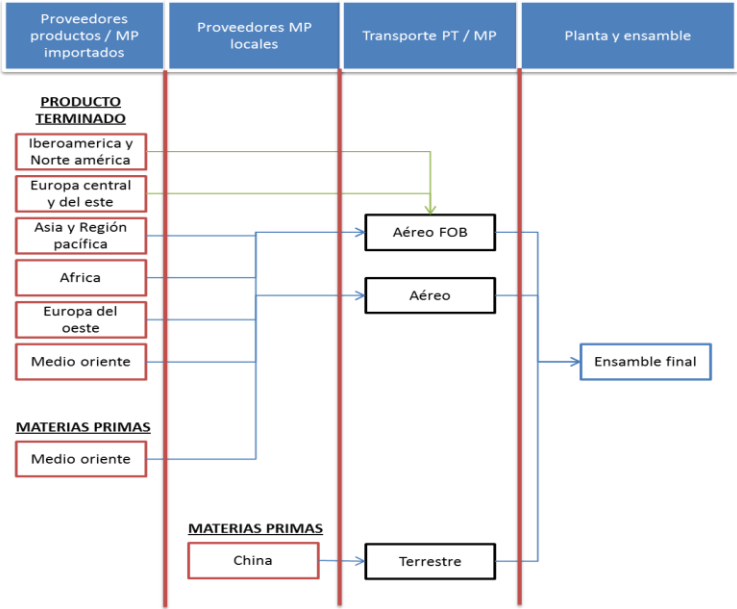


Fuente: El autor, 2012

Teniendo en cuenta que las emisiones de CO₂ de las aeronaves son iguales debido al criterio de mismo número de vuelos de las aeronaves, se debe considerar entonces la logística empleada para el transporte de las partes para cada una de las aeronaves a fin de establecer otro criterio

para asignar las emisiones relacionadas a la producción de las aeronaves. Considerando este criterio, se encuentra que los proveedores para cada uno de los fabricantes de las aeronaves, tanto Boeing como Airbus, están dispuestos en varios países alrededor del mundo. Los proveedores de materias primas y productos importados han sido agrupados en seis grandes regiones, para facilitar los cálculos. Airbus cuenta con 18.500 distribuidores, ubicados en 44 países proveedores, agrupados en las siguientes regiones: 3 países en América, 18 países en Europa del Oeste, 4 países en Oriente Medio, 5 países en Europa Central y del Este, 1 país en África y 13 países en Asia & Pacífico. Airbus tiene ubicado su punto de ensamble de sus aeronaves en China. A continuación se muestra el modelo logístico de transporte empleado por Airbus.

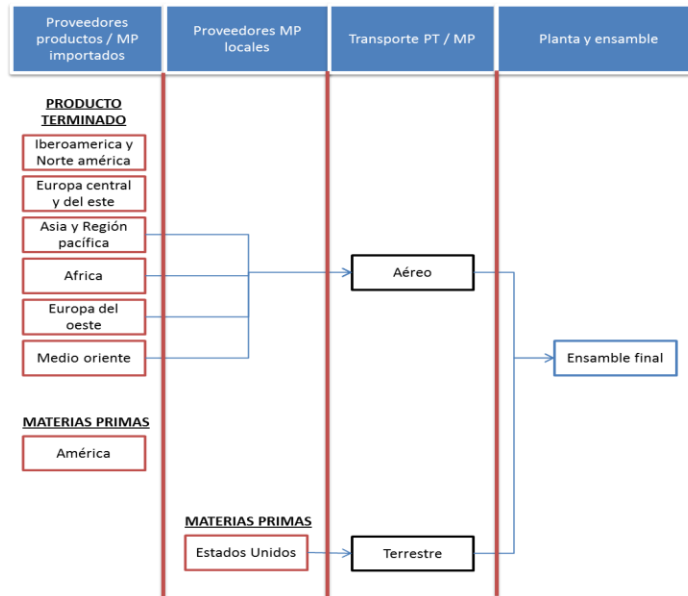
Figura 18. Modelo logístico de transporte para Airbus.



Fuente: El autor, 2012

Boeing cuenta con un total de 22.000 distribuidores, ubicados en 77 países proveedores, distribuidos en las siguientes regiones: 15 en América, 12 en Europa Central y del Este, 6 en África, 15 en Asia & Pacífico, 9 de Oriente Medio y 20 en Europa del Oeste. Boeing tiene ubicado su punto de ensamble de sus aeronaves en Estados Unidos. A continuación se muestra el modelo logístico de transporte empleado por Boeing.

Figura 19. Modelo logístico de transporte para Boeing.



Fuente: El autor, 2012

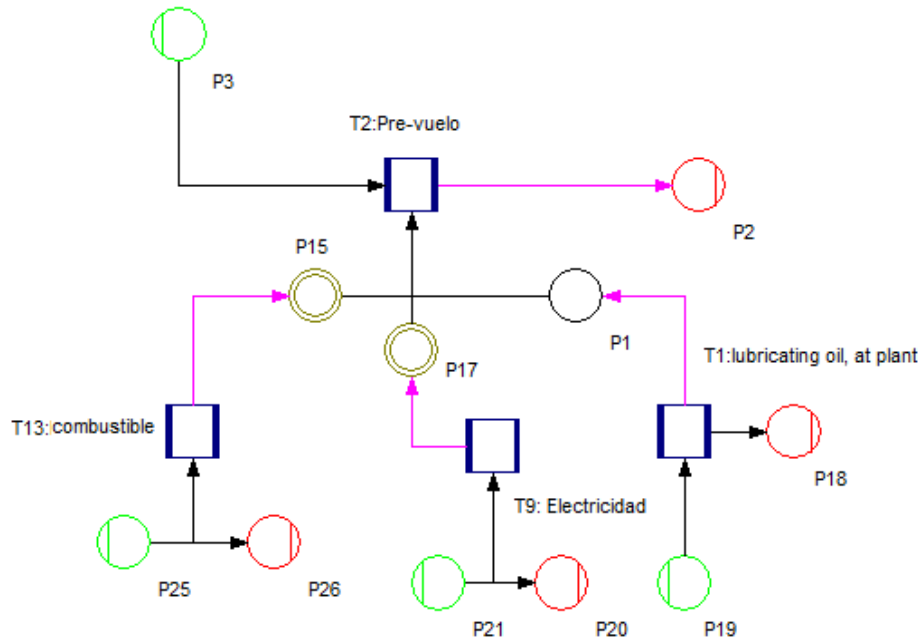
El listado de todos los países proveedores para cada uno de los fabricantes de aeronaves se encuentran en el Anexo G.

Para la asignación de emisiones relacionadas con el transporte se tuvo en cuenta la cantidad de países proveedores empleados por cada fabricante y las distancias promedio empleadas por región hacia el centro final de ensamblaje. Debido a la dificultad para conseguir los datos de transporte de todas las partes hacia el ensamble final, se asumió que el transporte aéreo es el medio empleado para el transporte empleado. Se sumaron como emisiones relacionadas al transporte terrestre aquellas que se encuentran en el mismo país del ensamble. Se encontró que la distancia total promedio recorrida para llevar las partes por parte de Airbus fue de 50.444,36 km, mientras que para Boeing fue de 59.813,1 km. De acuerdo con los parámetros anteriormente mencionados se calculó las emisiones para Boeing en 934,07 gCO₂ por pasajero para Boeing y las emisiones por pasajero para Airbus de 787.76 gCO₂, encontrándose que las emisiones para Boeing son mayores a las de Airbus en un 18,57%.

7.2.1.2 PRE-VUELO

Para la etapa de pre-vuelo se realizó el análisis para cada una de las aeronaves. En la siguiente figura se muestran las entradas y salidas tenidas en cuenta para la etapa de pre-vuelo de las dos aeronaves consideradas para el presente estudio.

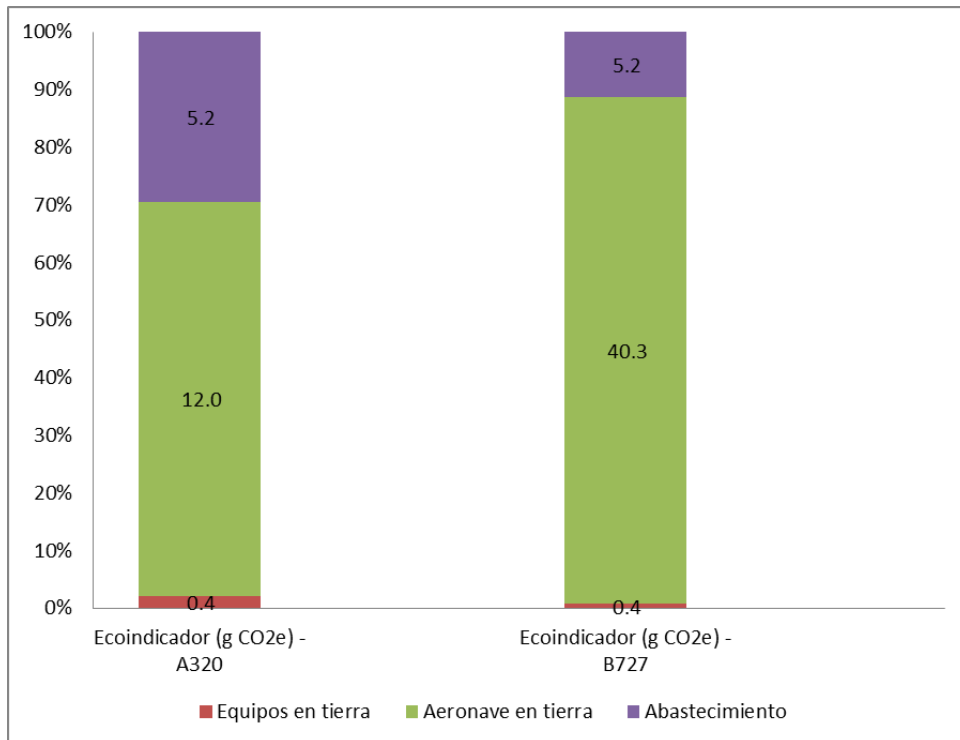
Figura 20. Entradas y salidas etapa pre-vuelo



Fuente: El autor mediante el uso del software Umberto®, 2012

Las emisiones acumuladas en la operación de las aeronaves se encuentran en la figura a continuación, donde se cuentan los equipos auxiliares empleados en tierra y las operaciones de las aeronaves en tierra (encendido motores, carreteo, operaciones de despegue, operaciones en puerta).

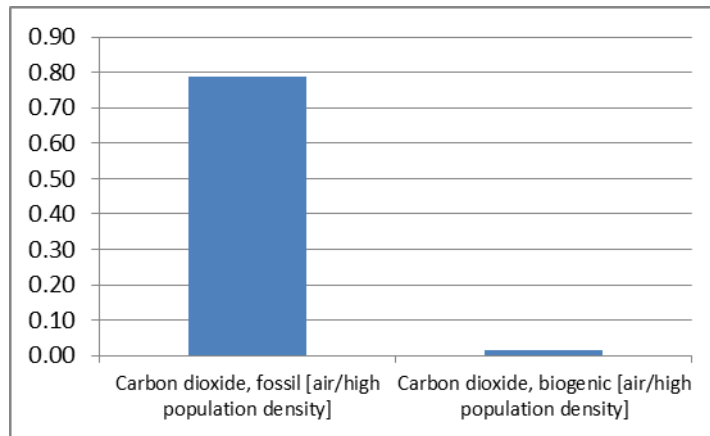
Figura 21. Emisiones CO₂e etapa Pre-vuelo



Fuente: El autor, 2012

Para el Airbus A320 se encontró que las emisiones de CO₂e por pasajero para el año 2011, fueron de 17.6 g CO₂e, siendo el mayor aporte de emisiones el carreteo y las operaciones en tierra (encendido de motores, operaciones en puerta, operaciones de despegue) con 12 g CO₂e, seguido del abastecimiento de la aeronave (transporte de combustible y aprovisionamiento) con 5.2 gCO₂e y finalmente el uso de los equipos auxiliares y de soporte en tierra con un aporte de 0.4 gCO₂e. También se encontró que las emisiones referentes a la extracción y producción del combustible, la producción del aceite y demás insumos empleados para el vuelo de la aeronave son equivalentes a 0,80 kg de CO₂e asignados por pasajero.

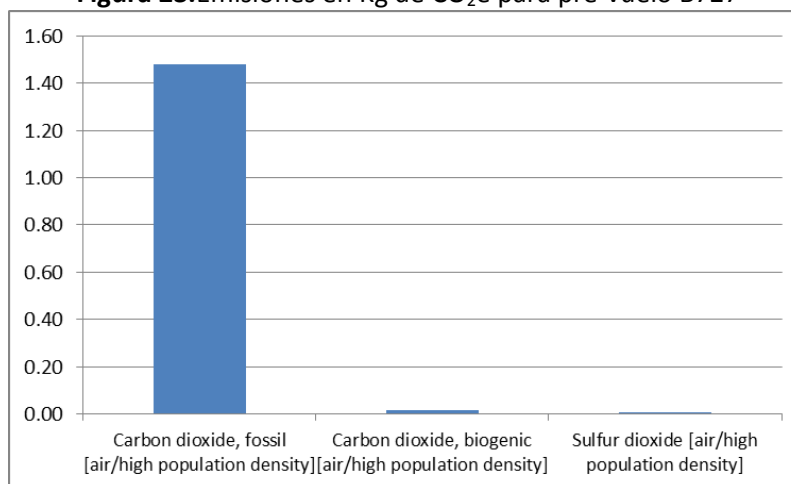
Figura 22.Emisiones en Kg de CO₂e para pre-vuelo A320



Fuente: El autor, 2012

Para el Boeing B727 se encontró que las emisiones de CO₂e por pasajero para el año 2011, fueron de 45.8 g CO₂e, siendo el mayor aporte de emisiones el carreteo y las operaciones en tierra (encendido de motores, operaciones en puerta, operaciones de despegue) con 40.3 g CO₂e, seguido del abastecimiento de la aeronave (transporte de combustible y aprovisionamiento) con 5.2 gCO₂e y finalmente el uso de los equipos auxiliares y de soporte en tierra con un aporte de 0.4 gCO₂e. También se encontró que las emisiones referentes a la extracción y producción del combustible, la producción del aceite y demás insumos empleados para el vuelo de la aeronave son equivalentes a 1,51 kg de CO₂e asignados por pasajero.

Figura 23.Emisiones en Kg de CO₂e para pre-vuelo B727



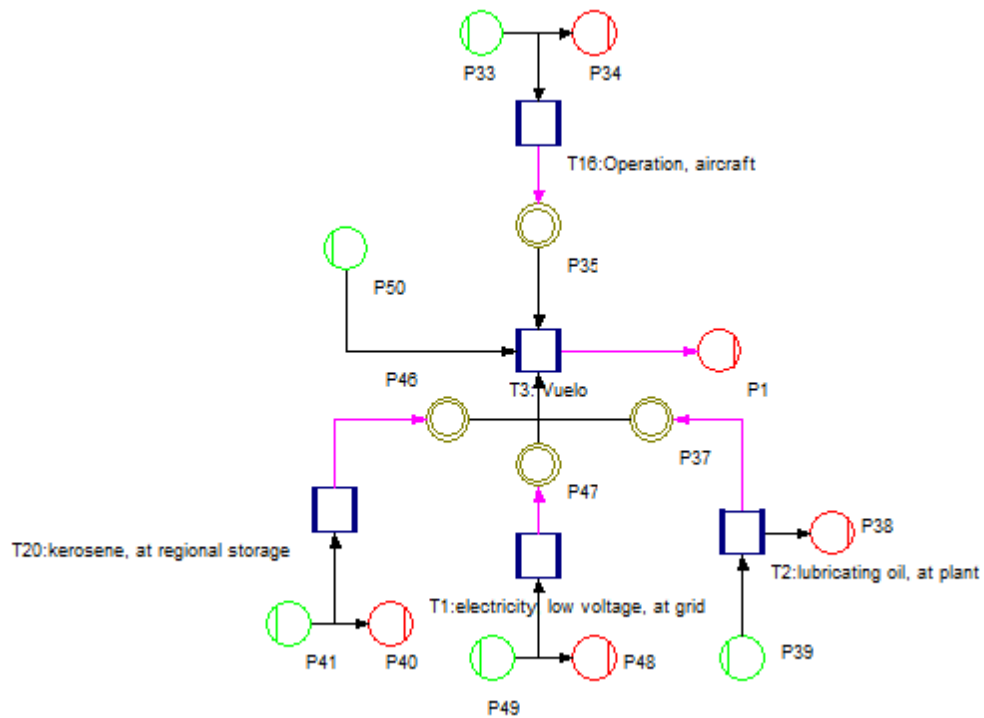
Fuente: El autor, 2012

Todas las emisiones generadas para la etapa de pre-vuelo se encuentran en el Anexo H.

7.2.1.3 VUELO

Para la etapa de vuelo se realizó un análisis conjunto, así como el análisis para cada una de las aeronaves. En la siguiente figura se muestran las entradas y salidas tenidas en cuenta para la etapa de vuelo de las dos aeronaves consideradas para el presente estudio.

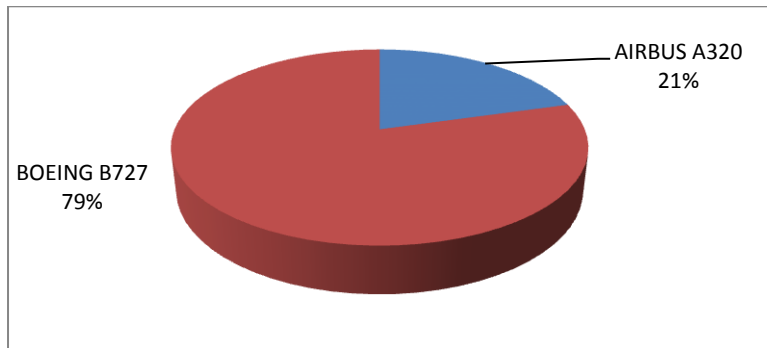
Figura 24. Entradas y salidas etapa vuelo



Fuente: El autor mediante el uso del softawer Umberto®, 2012

De acuerdo a los cálculos realizados por el autor, tomando como base los datos suministrados por la AeroCivil, se encontró que el porcentaje de emisiones totales de CO₂e para el vuelo corresponden en un 79% a la aeronave Boeing B727 y el 21% a la aeronave A320. A priori se puede decir que la aeronave Boeing B727 es menos amigable con el medio ambiente, con emisiones mayores en una relación de 3.7 veces las emisiones de la aeronave Airbus A320. Sin embargo esta observación no es tan certera, puesto que, debido a las distintas características de las aeronaves, la asignación de emisiones por pasajero por kilómetro concluye en que la diferencia de emisiones no es tan grande.

Figura 25. Porcentaje de emisiones CO₂e por aeronave

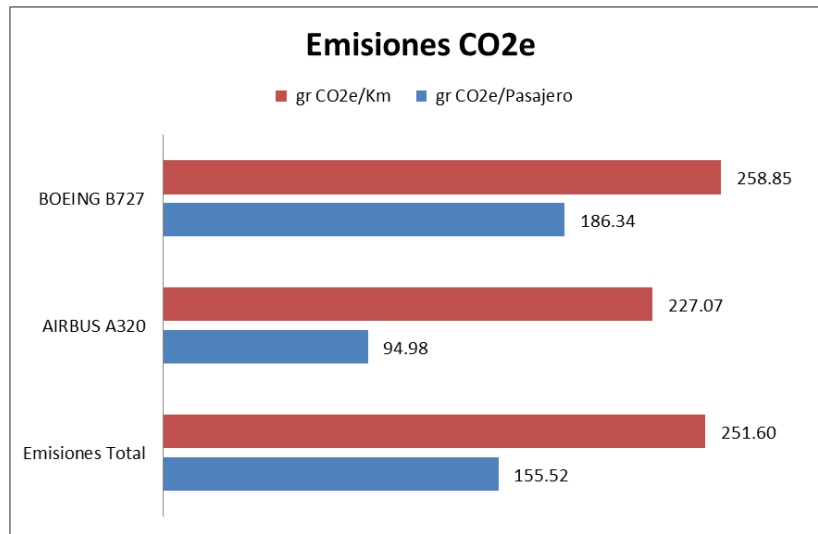


Fuente: El autor, 2012

El consumo de combustible de la aeronave B727 es mayor al igual que su capacidad de carga de 189 pasajeros. El consumo de la aeronave A320 es menor, igual forma su capacidad de carga de 150 es menor que la del Boeing B727. Estos datos pueden ser corroborados en la tabla 6 “Especificaciones técnicas de las aeronaves Airbus A320 y Boeing B727”, al inicio del subcapítulo 7.2 “Cálculo de huella de carbono”.

Dadas estas condiciones, al realizar la asignación de las emisiones a cada uno de los pasajeros (150 pasajeros para A320, 189 pasajeros para B727) y revisar las distancias recorridas por ambas aeronaves (34 vuelos considerados para A320 y 53 vuelos considerados para B727), se encontró que las emisiones de CO₂e por pasajero por kilómetro recorrido para el año 2011, fueron de 178.31 g CO₂e para ambas aeronaves. De acuerdo con DEFRA, las emisiones de CO₂e por pasajero por kilómetro recorrido son de 171g de CO₂e (DEFRA, 2010), por lo cual el presente estudio tiene una aproximación real a los estudios internacionales. Para los indicadores de g CO₂e/km, y g CO₂e/pasajero, se encontró un comportamiento particular para el caso de cada aeronave y para la operación conjunta.

Figura 26. Emisiones CO₂e etapa Vuelo

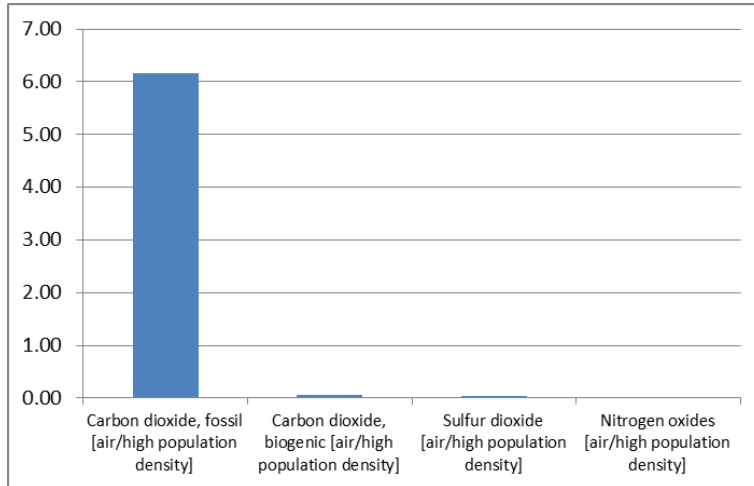


Fuente: El autor, 2012

Para la operación conjunta, teniendo en cuenta la cantidad de pasajeros total transportados, se encontró que las emisiones por pasajero transportado fueron de 155.52 g CO₂e. Teniendo en cuenta la distancia recorrida por las aeronaves, se encontró que las emisiones por kilómetro recorrido fueron de 251.60 g de CO₂e.

Para el Airbus A320 se encontró que las emisiones por pasajero transportado fueron de 94.98 g CO₂e. Las emisiones por kilómetro recorrido fueron de 227.07 g de CO₂e. También se encontró que las emisiones referentes a la extracción y producción del combustible, la producción del aceite y demás insumos empleados para el vuelo de la aeronave son equivalentes a 6,27 kg de CO₂e asignados por pasajero.

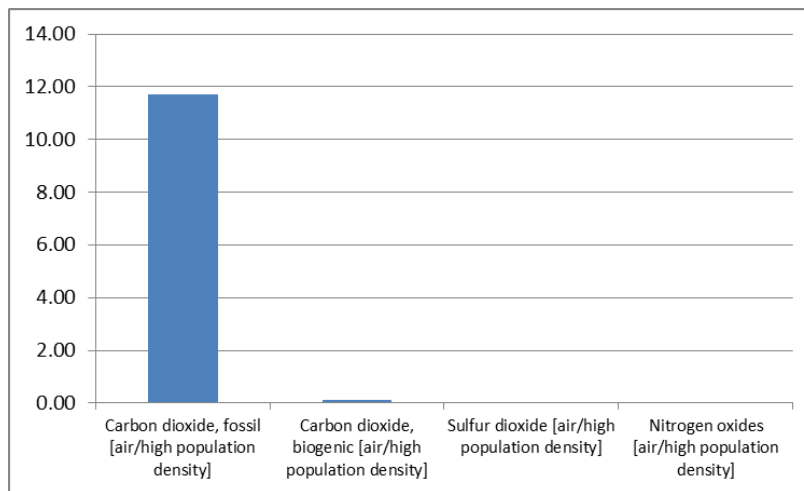
Figura 27. Emisiones CO₂e etapa Vuelo A320



Fuente: El autor, 2012

Para el Boeing B727 se encontró que las emisiones por pasajero transportado fueron de 186.34 g CO₂e. Las emisiones por kilómetro recorrido fueron de 258.85 g de CO₂e. También se encontró que las emisiones referentes a la extracción y producción del combustible, la producción del aceite y demás insumos empleados para el vuelo de la aeronave son equivalentes a 11,91 kg de CO₂e asignados por pasajero.

Figura 28. Emisiones CO₂e etapa Vuelo B727



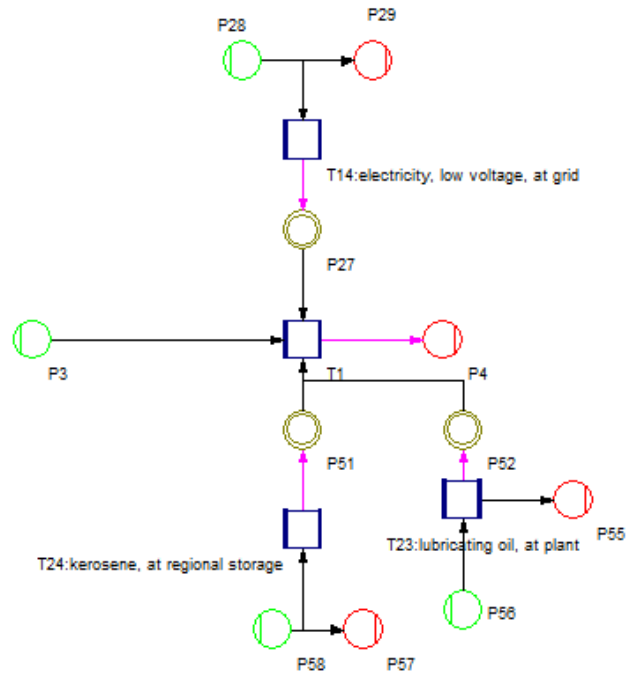
Fuente: El autor, 2012

Las emisiones generadas en la etapa de vuelo se encuentran en el Anexo I.

7.2.1.4 POS-VUELO

Para la etapa de pos-vuelo se realizó el análisis para cada una de las aeronaves. En la siguiente figura se muestran las entradas y salidas tenidas en cuenta para la etapa de vuelo de las dos aeronaves consideradas para el presente estudio.

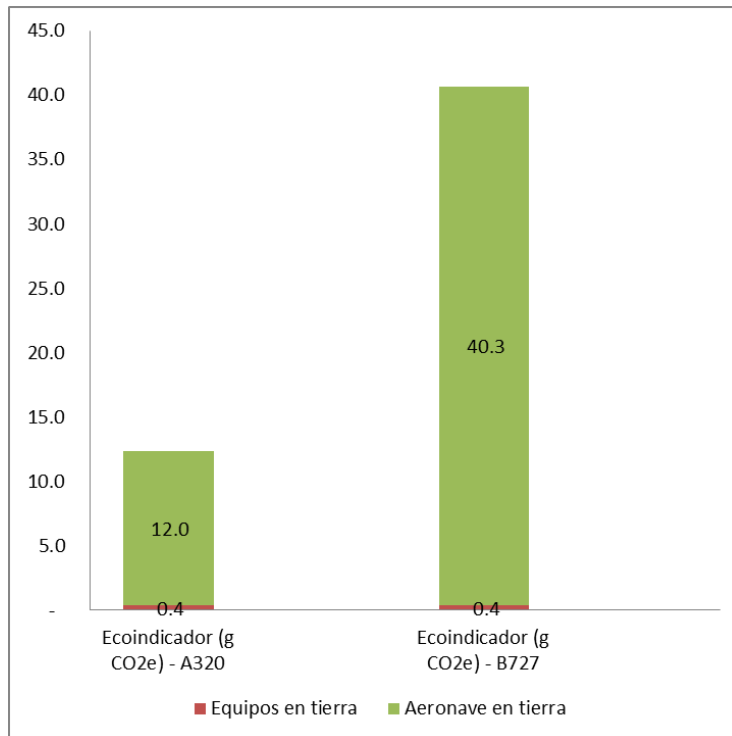
Figura 29. Entradas y salidas etapa vuelo



Fuente: El autor mediante el uso del softawer Umberto®, 2012

Se encontró que el consumo de combustible de las aeronaves en las maniobras en tierra y la energía empleada por los equipos en tierra es similar al de la etapa de pre-vuelo.

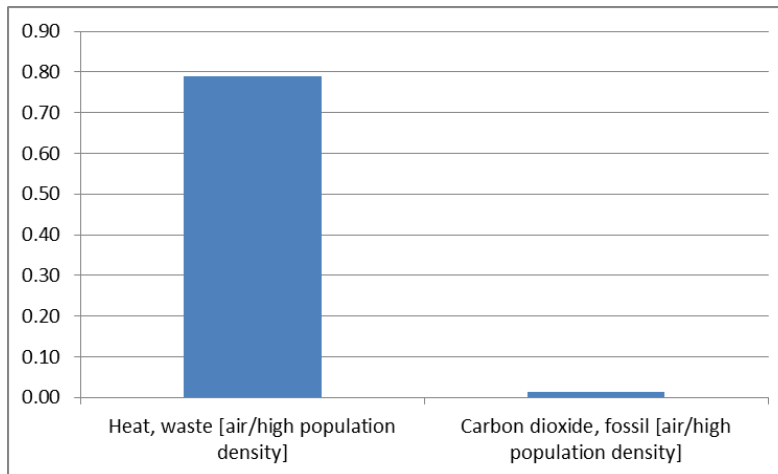
Figura 30. Emisiones CO₂e etapa Pos-vuelo



Fuente: El autor, 2012

Para el Airbus A320 se encontró que las emisiones de CO₂e por pasajero para el año 2011, fueron de 12.4 g CO₂e, siendo el mayor aporte de emisiones el carreteo y las operaciones en tierra con 12 g CO₂e y el uso de los equipos auxiliares y de soporte en tierra con un aporte de 0.4 g CO₂e. También se encontró que las emisiones referentes a la extracción y producción del combustible, la producción del aceite y demás insumos empleados para el vuelo de la aeronave son equivalentes a 0,80 kg de CO₂e asignados por pasajero.

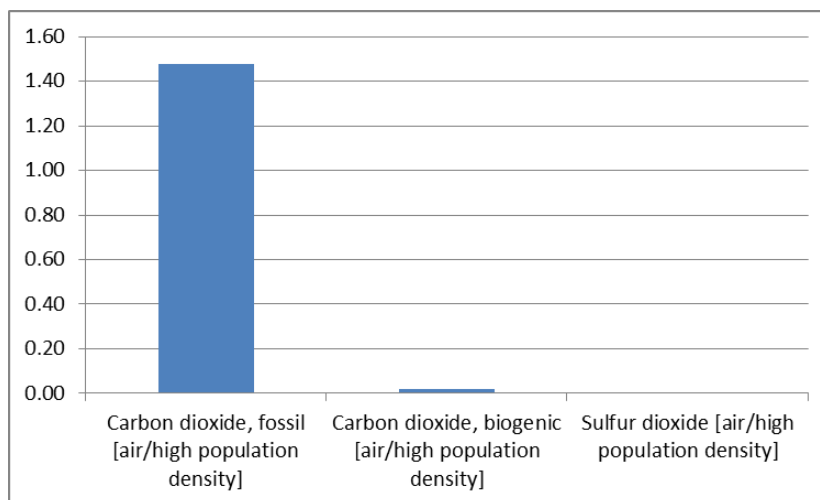
Figura 31. Emisiones CO₂e etapa Pos-vuelo A320



Fuente: El autor, 2012

Para el Boeing B727 se encontró que las emisiones de CO₂e por pasajero para el año 2011, fueron de 40.7 g CO₂e, siendo el mayor aporte de emisiones el carreteo y las operaciones en tierra con 40.3 g CO₂e, y el uso de los equipos auxiliares y de soporte en tierra con un aporte de 0.4 gCO₂e. También se encontró que las emisiones referentes a la extracción y producción del combustible, la producción del aceite y demás insumos empleados para el vuelo de la aeronave son equivalentes a 1,51 kg de CO₂e asignados por pasajero.

Figura 32. Emisiones CO₂e etapa Pos-vuelo B727



Fuente: El autor, 2012

Las emisiones generadas en la etapa de pos-vuelo se encuentran en el Anexo J.

7.3 ALTERNATIVAS

En la actualidad hay un fuerte desarrollo por parte de los constructores y fabricantes de aeronaves, respecto al mejoramiento de tecnología, eficiencia, aerodinámica, reducción de peso, motores más eficientes, modernización de flota, entre otras medidas, que buscan reducir la huella de carbono de las aeronaves desde la producción de las mismas.

En el caso de la operación de las aeronaves se han desarrollado y aplicado iniciativas que brindan la capacidad a la industria de disminuir las emisiones de CO₂, por medio de la administración eficiente de los recursos y la operación eficiente de las aeronaves.

En la tabla 8 se resume algunas de las alternativas de reducción de emisiones de GEI recopiladas de varios autores o entidades expertas, logradas a partir de experiencias previas y/o casos de estudio. Para ello se han clasificado dichas alternativas en dos enfoques de acción: estratégico y operativo. El enfoque estratégico contempla alternativas relacionadas con decisiones que impactan la optimización de los recursos a nivel gerencial; por otro lado el enfoque operativo contempla acciones periódicas que pueden conducir a una reducción del consumo de combustible en la operación.

Tabla 8. Enfoques de acción

Enfoque	Alternativa	Impacto	Fuente
Estratégica	Mejorar el factor de carga de la aeronave Optimizar carga paga en la aeronave	Mayor carga paga en la aeronave, reducción del número de viajes y consumo de combustible	Fransoo, 2011
	Eliminar o reducir viajes vacíos.	Reducción de viajes vacíos al compartir carga. Mayor utilización del vehículo	Fransoo, 2012 CEPAL, 2010
	Optimización de rutas aeronáuticas colombianas	Reducción de consumo de combustible	Fransoo, 2011
	Configuración de la flota	Modernización de flota (mejor desempeño aerodinámico)	Reducción consumo combustible hasta un 8%

	Sustitución o mezcla de combustibles	Combustibles alternativos	Reducción de emisiones de GEI	UNEP/TNT, 2006
	Sistemas de Información	Monitoreo permanente del consumo de combustible de la flota a través de herramientas tecnológicas y gestión de la información mediante una plataforma informática		CEPAL, 2010
Operativa	Pilotaje eficiente	Operar la aeronave bajo condiciones óptimas	5-10% en ahorro de combustible	CEPAL, 2010
	Control de tráfico aéreo eficiente	Disminuir el tiempo de la aeronave en carreteo	Reducción hasta del 20% del tiempo en tierra de las aeronaves.	Balakrishnan & Hansman, 2009
		Programa de inspección y mantenimiento.	3-7% de reducción en el consumo de combustible por inspecciones bien realizadas y reparaciones respectivas	CEPAL, 2010
	Gestión del mantenimiento	Control de equipos	Mantenimiento preventivo de los equipos.	CEPAL, 2011
		Mantenimiento adecuado de las partes	0,5% puede aumentar el consumo de combustible por el mal estado del filtro de aceite 1,5% puede aumentar el consumo de combustible por el mal estado del filtro de aire Hasta un 0,5% puede aumentar el consumo de combustible por el mal estado del filtro de combustible	Clean Air Initiative, 2010 Clean Air Initiative, 2010 Clean Air Initiative, 2010

Fuente: Elaboración propia

A continuación se profundiza en las alternativas de reducción de emisiones, con el propósito de ser evaluadas, teniendo en cuenta el nivel estimado de inversión y de impacto:

1. Mejoramiento del factor de carga de la aeronave.
2. Control de tráfico aéreo eficiente.
3. Pilotaje eficiente.
4. Monitoreo y control de consumo de combustible y otros parámetros de operación.
5. Gestión adecuada del mantenimiento
6. Modernización de la flota.
7. Optimización de rutas aeronáuticas colombianas.

8. Combustibles alternativos

Cada una de estas propuestas es analizada y ubicada a continuación, de acuerdo a las etapas del ciclo de vida empleadas para el presente estudio. Serán divididas en Alternativas Específicas para cada etapa y en Alternativas Generales, teniendo en cuenta algunos criterios y supuestos para estimar el impacto potencial en la reducción de las emisiones de CO₂.

7.3.1 ALTERNATIVAS ESPECÍFICAS

Las alternativas específicas para reducir las emisiones de CO₂ son aquellas que son aplicables a cada una de las etapas analizadas del ciclo de vida del presente proyecto.

7.3.1.1 ETAPA: USO DE LA AERONAVE

7.3.1.1.1 Gestión adecuada del mantenimiento.

Durante el 2011 en Colombia, del total de vuelos cancelados el 54.2% a correspondió a daños técnicos (AeroCivil, 2012). Los distintos daños técnicos presentados en las aeronaves fueron: falla en los sistemas aeroportuarios, falla de radares y sistemas de comunicación del aeropuerto, falla de superficies hipersustentadoras (alergones, flaps y spoilers) y la ingesta de objetos extraños por parte de los motores. (AeroCivil, 2012). La posibilidad de ingesta en motores se produce generalmente en las cercanías de los aeropuertos, en las operaciones que se realizan en tierra y durante las maniobras de despegue y aterrizaje, debido a la enorme succión de los motores. La ingesta de objetos extraños causa un desequilibrio en el funcionamiento del motor, provocando el desprendimiento de esquirlas, las cuales destrozan más piezas, haciendo que la avería se incremente, generando la detención obligada del motor. (Morse, 2009)

La naturaleza de las actividades de mantenimiento a las que se ve sometida un avión, puede ser doble:

- **Mantenimiento programado:** Corresponde con todas aquellas actividades cuya realización es impuesta por el programa preventivo de revisiones establecido por el fabricante, y que tiene como finalidad mantener el alto nivel de fiabilidad de los aviones.
- **Mantenimiento no programado:** Corresponde con aquellas actividades de mantenimiento que se realizan cuando surgen incidentes inesperados en el avión. Dependiendo del nivel de importancia de éstos, puede ocurrir que la subsanación de los efectos del incidente

puedan diferirse (el avión puede seguir volando ya que no existe un riesgo significativo para la seguridad del vuelo) o puede ocurrir que deban subsanarse de inmediato.

Durante todas las operaciones de mantenimiento se sigue un registro de incidencias y datos de evaluación de los componentes, para mantener la aeronavegabilidad continuada. Las emisiones asociadas al mantenimiento de las aeronaves pueden ser reducidas a través de una adecuada gestión del mantenimiento y la implementación de programas de calidad asociadas al mismo, como Calidad Total, Mantenimiento Productivo Total (Total Productive Maintenance – TPM), entre otros.

Un caso aplicado de mejores prácticas de mantenimiento es el de la empresa alemana Lufthansa, la cual en su centro de servicios técnicos Lufthansa Technik, donde se han desarrollado numerosos procedimientos y nuevos procesos que ayudan a que las aeronaves consuman menos combustible y, de este modo, signifiquen una carga menor para el medio ambiente. Entre las buenas prácticas aplicadas por Lufthansa se encuentra el uso de equipos electrónicos para reemplazar a los manuales impresos ahorrando 2,5 toneladas anuales en papel, la implementación de sistemas de integración como SAP para solicitar las partes con antelación al mantenimiento a fin de no tener partes ociosas en el almacén, optimizó y agendó los tiempos de mantenimiento de sus aeronaves reduciendo los tiempos muertos de las mismas, y una planeación adecuada de mantenimiento de las aeronaves, así como una reubicación de sus instalaciones a fin de disminuir los tiempos entre las actividades de mantenimiento. Además, Lufthansa Technik no sólo apoya a la flota de Lufthansa con sus servicios técnicos, sino que también ofrece su experiencia a muchas otras aerolíneas en todo el mundo. Actualmente, más de 600 clientes confían en la competencia de la empresa que tiene su base en Hamburgo. En Colombia algunas aerolíneas actualmente optimizan los tiempos de mantenimiento de las aeronaves, intentando reducirlos al mínimo garantizando la seguridad y calidad en las operaciones; de igual forma las aerolíneas en su mayoría han reorganizado sus instalaciones con la intención de proporcionar el mantenimiento a un mayor número de aeronaves, sin embargo no se ha pensado en soluciones para reducir los tiempos entre tareas por ejemplo.

7.3.1.2 ETAPA: PRE-VUELO

7.3.1.2.1 Mejoramiento del factor de carga de la aeronave

De acuerdo con los estudios realizados por Balakrishnan & Hansman (2009), Dakhel, Lukachko, Waitz, Miake-Lye, & Brown (2005), Fuglestedt et al, (2009), las aeronaves se despachan con su capacidad de carga no explotada en un 100%. Se puede encontrar la mayor oportunidad de incrementar el factor de carga de las aeronaves reduciendo costos de tiquetes, empleando promociones, ofreciendo descuentos de último minuto, con el fin de obtener un mayor porcentaje de sillas ocupadas, reduciendo las emisiones de CO₂ asignadas por persona y por kilómetro recorrido. Se presentan casos exitosos de aplicación de dicho modelo en diferentes aerolíneas, tales como EasyJet, BlueJet, Aer Araan, Ryanair, entre otras, las cuales han disminuido las emisiones promedio por persona al transportar una mayor cantidad de pasajeros y no tener casi espacios vacíos en sus vuelos (The Low Carbon Economy Ltd, 2006 - 2012). En Colombia algunas aerolíneas como Avianca, LAN y AeroRepública, han empezado a utilizar un modelo similar para tener una mayor ocupación de sus aeronaves, por medio de precios especiales o promocionales para distintos vuelos. (IATA, 2009). De acuerdo a la AeroCivil, en Colombia el porcentaje promedio de ocupación de las aeronaves están en un 74% para vuelos domésticos y en un 80% para vuelos internacionales (Rivera, 2012).

El factor de ocupación de la aeronave permite tener una disminución en las emisiones de CO₂ equivalentes por persona; es decir, si una aeronave emite en promedio 0,1715 kg de CO₂ para una distancia de 1 km (DEFRA, 2010), asumiendo que dicha aeronave cuente con una capacidad de 150 pasajeros, la asignación de emisiones de CO₂ para cada pasajero sería de 0,00114 Kg de CO₂ por Km por pasajero, en caso de que la aeronave opere con un porcentaje de ocupación de 100%. Si la aeronave opera con ocupación promedio del 74%, es decir con 111 pasajeros, las emisiones asignadas a cada pasajero son de 0,00154 Kg de CO₂ por Km por pasajero. Para una ocupación baja, estimada en un 30%, con 45 pasajeros, las emisiones asignadas serían de 0.00381 Kg de CO₂ por Km por pasajero.

7.3.1.2.2 Monitoreo y control de consumo de combustible y otros parámetros de operación.

Para llevar a cabo la evaluación del escenario de implementación de un sistema de monitoreo y control, se tuvo en cuenta el estudio realizado por Flight Safety Foundation en 2010, donde se

definen los monitoreos y controles mínimos para optimizar el consumo de combustible de una aeronave:

- Revisión adecuada del combustible, asegurando que la aeronave cuente con la cantidad requerida de combustible antes de cada vuelo.
- Revisión de información climatológica fidedigna para que la tripulación determine la carga adecuada de combustible en los planes preliminares al vuelo.
- Revisión de plan de vuelo, asegurando en lo posible que se realizará por instrumentos (Instrument Flight Rules – IFR), teniendo en cuenta la cantidad de combustible necesaria, incluyendo encendido de motores, rodamiento en pista, recorrido, aproximación y tránsito hacia el destino alterno, además de contar con un 10% adicional del combustible total del recorrido. Si el vuelo se realiza por visual (Visual Flight Rules – VFR) debe asegurarse que la carga de combustible sea la necesaria para cubrir la ruta. (Flight Safety Foundation, 2010)

Es esencial que los operadores de las aeronaves desarrollen un sistema de información de administración de combustible en tiempo real, de tal forma que puedan comparar los datos planeados para el vuelo con los datos de consumo reales de la operación y establecer puntos críticos o posibles puntos de mejora. (Martineau, Bell, MacCourt, Johnson, & Pawley, 2011). A través del monitoreo y control de combustible es posible hacer seguimiento a las etapas críticas de la operación, tiempos y combustibles empleados en carreteo, sobre-llenado de combustible, consumo de combustible real versus planeado, consumo específico de la aeronave, eficiencia del desempeño de los pilotos, plenación y optimización de los despachos de combustible.

7.3.1.3 ETAPA: PRE-VUELO Y POS-VUELO

Se presentan en conjunto alternativas de reducción de emisiones de CO₂ para ambas etapas, pues ambas etapas se ven beneficiadas por la implementación de las alternativas.

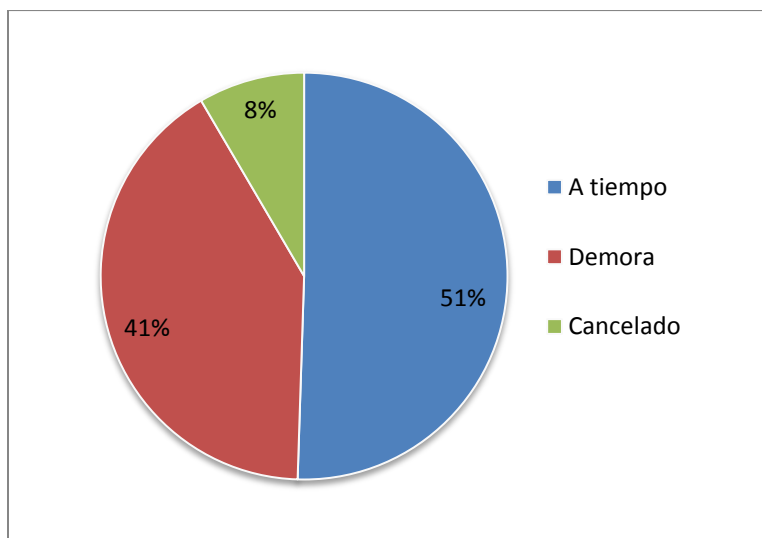
7.3.1.3.1 Control de tráfico aéreo eficiente

El carreteo de las aeronaves contribuye de forma significativa al consumo de combustible y la generación de emisiones en los aeropuertos. Las cantidades de combustible quemado, así como los contaminantes como CO₂, CO, HC, NO_x, SO_x y partículas, son proporcionales a los tiempos de carreteo de la aeronave, en combinación con otros factores como ajustes del acelerador, número de motores encendidos, decisiones de pilotos y aerolíneas sobre apagado de motores durante retrasos, entre otros. De acuerdo con Balakrishnan & Hansman, en el 2007 “las aeronaves en

Estados Unidos gastaron más de 64 millones de minutos carreando hasta sus puertas de destino y más de 150 millones de minutos carreando desde sus puertas hasta la cabecera de la pista. De la misma forma en Europa, se estima que una aeronave gasta entre el 10% y 30% de su tiempo de vuelo en el carreteo y que una aeronave de alcance medio (como un Airbus A320) gasta entre el 5% y 10% de su combustible mientras se encuentra en tierra”

De acuerdo con el Boletín Estadístico de la Aerocivil de 2010, los vuelos domésticos en Colombia representan el 88.1% de la operación de transporte aéreo regular. De un total de 16.007 vuelos realizados promedio por mes, 8.085 cumplieron (51%), 6.570 sufrieron demoras (41%) y 1.352 fueron cancelados (8%), lo que se puede apreciar en la figura a continuación.

Figura 33. Porcentaje de vuelos a tiempo, demorados y cancelados en 2010



Fuente: AeroCivil, 2010

Del total de vuelos cancelados, el 7.5% obedecieron a falla de tráfico, el 32.5% a causas incontrolables como cierres de aeropuertos debidos a condiciones climáticas adversas, baja visibilidad, lluvias intensas, entre otras, el 54.2% a daños técnicos y el 5.7% a operacionales. En cuanto a los vuelos demorados, se tiene que el 0.23% corresponde a falla de tráfico, el 34.08% es imputable a causas incontrolables, el 52.7% a daños técnicos y el 13% a motivos operacionales.

Es apreciable que uno de los factores críticos en los retrasos y cancelaciones de vuelos, es el daño técnico sufrido por las aeronaves, lo cual se analizará en el capítulo gestión adecuada del mantenimiento.

El factor de cumplimiento de los vuelos programados por las empresas para el año 2010, que corresponde a la relación entre los vuelos cumplidos y los vuelos programados, fue del 59.73% para la operación nacional. Este índice de cumplimiento muestra la probabilidad de salir a tiempo en un vuelo internacional y doméstico. El promedio de demora en la operación doméstica es de 51 minutos, oscilando por empresa, entre 41 y 61 minutos. Para la operación internacional, el promedio de demora es de 67 minutos, oscilando entre los 15 y 300 minutos. (AeroCivil, 2010)

El factor de operación (tráfico en tierra, carreteo desde puerta a pista, carreteo de pista a puerta) juega un papel importante en las emisiones de CO₂, puesto que, de la operación eficiente en tierra depende que el consumo de combustible sea el necesario y no haya un consumo exagerado por demoras. De acuerdo con un estudio realizado por AeroAstro (2007), los retrasos domésticos en el año 2007 consumieron 740 millones de galones de jet fuel, emitiendo 7.100 millones de kilogramos de CO₂ a la atmósfera. El 85% de los retrasos ocurridos en 2007 se dieron en tierra, de los cuales el 60% se dieron en la puerta antes del despegue de la aeronave, mientras otro 20% se dio mientras la aeronave se encontraba en carreteo hacia la cabecera de la pista preva al despegue. (Balakrishnan & Hansman, 2009).

Como alternativa de reducción se propone realizar operaciones con un solo motor encendido durante las operaciones después del aterrizaje y en las operaciones previas al despegue. En un estudio realizado por AeroAstro en el aeropuerto internacional Logan en Boston se encontró que el 52% de los pilotos utilizan operaciones con un solo motor en el 75% de las veces en el carreteo al aterrizaje, mientras que en la etapa previa al despegue se utilizaba en menos del 10% de las veces. Se encontró que aplicando la operación con un solo motor en el aeropuerto durante 8 horas, se ahorraron más de 15.000 kg de combustible, con un ahorro promedio por aeronave entre 50 y 60 kg en el carreteo puerta a cabecera.

7.3.1.4 ETAPA: VUELO

7.3.1.4.1 Pilotaje eficiente

Es necesario desarrollar un programa de pilotaje eficiente operando la aeronave bajo condiciones óptimas de desempeño como peso óptimo de despegue, tanqueo eficiente de combustible, mantenimiento adecuado, entre otros, además teniendo en cuenta factores asociados a la operación como el clima, las temperaturas, condiciones de nubosidad, entre otros. Tomando en cuenta el estudio realizado por CEPAL en 2010, a continuación se presenta un resumen de la guía de procedimientos propuesta para llevar a cabo el pilotaje eficiente. La guía completa puede ser encontrada en el Anexo K.

Tabla 9. Guía de procedimientos propuesta

DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE	INSPECTOR	DURACIÓN (min)
1. Realice el control del libro de anomalías abordo.	PILOTO/TLA	IEA / UAEAC	3
2. Registre si hay o no anomalías en el libro "Log Book".	PILOTO/TLA	IEA / UAEAC	2
3. En caso de anomalía, realice el procedimiento de revisión de la misma.	TLA	IEA / UAEAC	30
CONTROL EN TIERRA			
4. Realice el control rutinario de aeronave: Control de tubos pito-estáticos, control de superficies hipersustentadoras, control de trenes y ruedas, control revisión exterior de motores, revisión general del fuselaje, revisión de luces.	PILOTO/TLA	IEA / UAEAC	15
5. Revise plan de vuelo propuesto inicial.	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	10
6. Revise condiciones climatológicas al momento.	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	3
7. Revise distancias y realice cálculos de combustible necesario (combustible necesario para el trayecto + sobrevuelo + 30 minutos aeropuerto más cercano)	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	10
8. Seleccione ruta para cumplir con el plan de vuelo.	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	2
9. Solicite el suministro de combustible para la aeronave, de acuerdo a la cantidad de combustible requerido calculado	PILOTO	IEA / UAEAC	3
10. Verifique que la cantidad de combustible suministrada sea la solicitada	PILOTO	IEA / UAEAC	2
CONTROL EN VUELO			

11. Revise periódicamente los indicadores abordo de la aeronave (combustible, potencia de motores, velocidad real, velocidad respecto a tierra, altitud, VNE, ADF, GPS, superficies hipersustentadoras, demás indicadores de acuerdo al manual y procedimiento de vuelo regular)	PILOTO	IEA / UAEAC	45
12. Revise periódicamente el radar meteorológico para verificar que no hayan cambios en las condiciones climáticas en la ruta. En caso de cambio en las condiciones, realice los procedimientos considerados de acuerdo a la condición particular.	PILOTO	IEA / UAEAC	N/A
APROXIMACIÓN Y ATERRIZAJE			
13. Anuncie su llegada al controlador de tráfico aéreo con suficiente tiempo de anticipación, a fin de que el ATC pueda ubicarlo en la fila para aterrizaje	PILOTO/ATC	IEA / UAEAC	1
14. Realice los procedimientos para aterrizaje indicados por la torre de control.	PILOTO/ATC	IEA / UAEAC	10
15. Realice carreteo de la aeronave hasta el punto designado	PILOTO/ATC	IEA / UAEAC	5
16. Realice la respectiva verificación pos-vuelo de los instrumentos de la aeronave.	PILOTO	IEA / UAEAC	5
17. Realice el reporte de vuelo en el libro de abordo "Log Book" e informe si se presentaron anomalías	PILOTO	IEA / UAEAC	5

Fuente: Elaboración propia, utilizando como base los procedimientos indicados por AeroCivil.

De acuerdo al estudio realizado por Deuman en el 2010, se encontró que con un rendimiento adecuado de las aeronaves, bajo los parámetros recomendados de desempeño, estima un ahorro de combustible del 5-10%, dando como resultado una reducción similar en la generación de emisiones de CO₂.

Casos aplicados para realizar un pilotaje eficiente es la propuesta de Rockwell Collins son las pantallas táctiles que se muestran en la ventana del piloto, ayudando a mantener un mejor control sobre el rendimiento técnico de la aeronave, la posición, las condiciones climáticas y el tráfico aéreo durante el vuelo, permitiendo al piloto reaccionar más rápido y adecuadamente a cambios en el medio ambiente y emergencias de la aeronave. (IATA, 2012)

7.3.2 ALTERNATIVAS GENERALES

Las alternativas generales para reducir las emisiones de CO₂ son aquellas que son aplicables para realizar reducción de emisiones de la aviación general en Colombia, pero que no son específicas para cada una de las etapas del ciclo de vida del presente estudio.

7.3.2.1 Modernización de la flota

La modernización o actualización de la flota de aeronaves de una compañía es una inversión que requiere de un fuerte músculo financiero para realizar el préstamo, arrendamiento o compra de las aeronaves. Sin embargo es una inversión con retorno en el mediano y largo plazo, a través de la reducción en la cantidad de combustible a comprar, aumento de la autonomía de las aeronaves, aumento de la capacidad de transporte de carga paga, disminución de los costos debidos a los tiempos de mantenimiento de las aeronaves, entre otros.

Alrededor del mundo se está realizando dicha modernización de flotas en distintas compañías, por ejemplo KLM ha actualizado la flota con los más modernos aviones Boeing 777 y Airbus A330 para rutas intercontinentales, que ahorran hasta un 25% más de combustible que sus predecesores. Además, los vuelos de KLM cityhopper se están realizando con reactores Embraer que ahorran un 10% más de combustible (KLM, 2012). En Colombia las compañías Satena, LAN, AeroRepública y Avianca actualmente se encuentran en proceso de modernización de sus flotas (AeroCivil, 2012). Durante el 2010, AeroRepública realizó el proceso de modernización de su flota, retirando las aeronaves McDonell-Douglas MD-80 y reemplazándolas con Embraer ERJ-190, lo que permite ofrecer un servicio más eficiente y más amigable con el medio ambiente. La flota de ERJ-190 utiliza un 32% menos de combustible que otra clase de aeronaves, minimizando el impacto ambiental en sus operaciones (Embraer, 2011). Avianca por su parte ha modernizado su flota retirando del servicio aeronaves McDonell-Douglas MD-80 y MD-11ER, Boeing 757 y 767, Fokker 100, reemplazándolas con flota Airbus: diez A318, catorce A319, treinta y siete A320, cinco A321 y cinco A330. La familia Airbus A320 (A318, A319, A320 Y A321) es reconocida como la marca de referencia de aviones de pasillo único, cuenta con un 99.7% de confiabilidad y períodos extendidos de servicio, operando también con los costos más bajos entre los aviones de su tipo. La reducción de consumo de combustible es de alrededor del 3.5 %, resultando en una reducción anual por aeronave estimada de 700 toneladas de CO₂ (Airbus, 2012). LAN ha reemplazado en su flota las aeronaves Bombardier Dash 8, incorporado a su flota aeronaves cinco aeronaves A320, que incorporan motores más eficientes, así como un mejor desempeño aerodinámico, ofreciendo un

importante ahorro de combustible (Airbus, 2012). La aerolínea Satena ha reemplazado sus aviones Embraer ERJ-145 por aeronaves ATR 42-500 y ATR 72-500, pues ofrecen un 20% de ahorro de combustible respecto a aeronaves de la misma categoría y con una capacidad de carga de 70 pasajeros. (ATR Aircraft, 2011)

7.3.2.2 Combustibles alternativos

Los combustibles alternativos en la aviación todavía se encuentran en etapa de estudio y desarrollo, puesto que el criterio más importante a cumplir es la compatibilidad con los sistemas e infraestructura de la aviación comercial, incluyendo los sistemas de almacenamiento y tanqueo de los combustibles, así como la flota de aeronaves. Las métricas compiladas por Hileman, y otros (2009), son empleadas para comparar la selección de los combustibles alternativos para la aviación se nombran a continuación:

- *“Compatibilidad con sistemas actuales. Compatibilidad con infraestructura y sistemas de las aeronaves.*
- *Nivel de desarrollo del combustible (FRL). Analiza la madurez tecnológica actual del combustible y su proceso de producción.*
- *Producción Potencial. Es el potencial del combustible para reemplazar a los combustibles convencionales, resultando en reducción del precio del petróleo y beneficios ambientales.*
- *Costo potencial. El costo por la producción del combustible alternativo debe ser competitivo con su contraparte.*
- *Emisiones GEI. Se examinan las emisiones asociadas a mover una carga paga por una distancia, comparándola con los combustibles tradicionales.*
- *Emisiones Calidad del aire. Se estima a través de análisis de emisiones que contribuyen con el Potencial de Calentamiento Global (GWP)*
- *Aplicabilidad en la aviación. Se analiza el combustible alternativo bajo las ventajas relativas y costos, sobre los combustibles tradicionales.” (Hileman, y otros, 2009)*

Realizando el análisis bajo las distintas métricas para los combustibles alternativos actualmente empleados, se encuentra un beneficio potencial para cada uno de ellos, los cuales se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 10. Combustibles alternativos

Combustible	Fuente	Notas	Beneficio
Jet A generado de combustible tradicional	Refinación de petróleo convencional y no convencional	A través de la refinación, las fuentes de petróleo producen los combustibles que cumplan las especificaciones de Jet A	Reducción del 1% en las emisiones de GEI. (EIA E. I., 2000)
Ultra Low Sulfur Jet A	Refinación de petróleo convencional y no convencional	A través de la refinación, las fuentes pueden producir combustibles con propiedades similares	Reducción del 0.3% del peso del combustible, reducción en algunos costos de mantenimiento asociados a una mayor estabilidad térmica, reducción de corrosión, aumentando la vida útil. (EPA, 2000)
Fisher-Tropsch combustible sintético (FT)	Síntesis de gas natural, carbón, carbón con secuestro de CO ₂ , biomasa	Es keroseno parafinado sintético (SPK)	Reducción en 0.3% la energía específica necesaria para convertir el combustible en empuje, reduciendo emisiones. (Bartis, Camm, & Ortiz, 2008)
Biodiesel / Biokeroseno	Reacción química de aceites vegetales o grasas animales	Actualmente en uso como mezcla y sustituto de combustible en los automóviles	Una mezcla del 20% reduce la energía específica en un 4%. (Hileman & Donohoo, 2009)
Combustible Hydroprocessed Renewable Jet Fuel (HRJ)	Hidrotratamiento de aceites vegetales o grasas animales, para crear un combustible libre de oxígeno	También es un combustible SPK	Reducción 0.3% energía específica. Reducción de emisiones hasta 10% (no se incluyen las emisiones provenientes del uso de la tierra para la producción). (Searchinger, y otros, 2008)
Alcoholes (etanol y butanol)	Fermentación de azúcares, cereales y materias primas celulósicas	Actualmente en uso mezcla con combustible.	Reducción de 40% en la energía específica para el etanol y del 23% para butanol. (Ramey & Yang, 2005)

Fuente: Adaptada de Hileman, y otros, 2009

7.3.2.3 Optimización rutas aeronáuticas

En el entorno actual de operaciones aeronáuticas, una parte significativa del tráfico aéreo no puede realizarse en la ruta más eficiente de combustible. El proceso de planificación de vuelo, que se realiza con antelación a la salida, y donde la ruta se ha optimizado con la información disponible en ese momento, puede ser potenciado por una re-planificación en mitad del vuelo, concretamente durante la fase de crucero, teniendo en cuenta nuevas condiciones, como el peso de despegue o las nuevas previsiones meteorológicas.

Las rutas aeronáuticas domésticas en Colombia que tienen mayor participación de pasajeros en el mercado aeronáutico de acuerdo con la AeroCivil, se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 11. Rutas domésticas con mayor participación de pasajeros

Ruta doméstica	Código IATA	Personas transportadas año 2009	Factor ocupación global (%)	Porcentaje de participación
Bogotá-Medellín-Bogotá	BOG-MDE-BOG	1'118.223	71.51	13.41
Bogotá-Cali-Bogotá	BOG-CLO-BOG	1'077.946	72.44	12.92
Bogotá-Cartagena-Bogotá	BOG-CTG-BOG	661.896	73.74	7.94
Bogotá-Barranquilla-Bogotá	BOG-BAQ-BOG	529.718	76.36	6.35
Bogotá-Bucaramanga-Bogotá	BOG-BGA-BOG	330.385	74.75	3.96
Bogotá-Pereira-Bogotá	BOG-PEI-BOG	303.523	71.94	3.64
Bogotá-Cúcuta-Bogotá	BOG-CUC-BOG	205.659	69.82	2.47
Cali-Medellín-Cali	CLO-MDE-CLO	141.650	71.84	1.70
Bogotá-Montería-Bogotá	BOG-MTR-BOG	137.607	60.48	1.65
Otras	N/A	3.833.916	N/A	46.95

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de AeroCivil, 2010

En la tabla 9 se observa que de las nueve rutas domésticas principales, solamente la octava (CLO-MDE-CLO) no es operada desde Bogotá en el Aeropuerto Internacional El Dorado; de igual forma es posible apreciar que las rutas con mayor número de pasajeros transportados son las 4 primeras: BOG-MDE-BOG, BOG-CLO-BOG, BOG-CTG-BOG, BOG-BAQ-BOG. Desde el Aeropuerto El Dorado se moviliza el 35% de los pasajeros domésticos y el 70% de los pasajeros internacionales, además del 40% de la carga doméstica y el 80% de la carga internacional. (AeroCivil, 2010) Para Colombia

sería posible revisar estas cuatro rutas para realizar una propuesta de optimización de las mismas, a fin de reducir los tiempos en el aire de las aeronaves, disminuyendo las emisiones de CO₂ en proporción directa a la reducción de los combustibles consumidos.

Un ejemplo claro de aplicación de optimización de rutas aeronáuticas es el proyecto DORIS (Dynamic Optimization of the Route In flight), el cual concluyó recientemente la validación de su modelo de optimización de rutas interoceánicas en Europa con las compañías Iberia, Air Europa, INECO, AESA, SENASA y NAV Portugal. El resultado de la aplicación del modelo a 44 vuelos transoceánicos es la reducción de los consumos de combustible por vuelo en un 2.5%, equivalente a 995 kg de combustible, con una reducción de emisiones de 3134 kg de CO₂.

Como una propuesta a la optimización de las rutas aeronáuticas en Colombia se propone el desarrollo de un modelo matemático basado en el modelo meta-heurístico de la colonia de hormigas. Esta propuesta de modelo se presenta en un desarrollo básico pues no es el núcleo del presente proyecto, sin embargo posteriormente se puede continuar por parte de otras personas la investigación sobre el tema y desarrollar el modelo. El pseudo-código del modelo se presenta en el capítulo “Modelo matemático para la optimización de rutas aeronáuticas”

7.4 ANÁLISIS FINANCIERO

Las aerolíneas invierten grandes sumas de dinero para realizar sus operaciones, contando entre los gastos la compra de combustible, el mantenimiento de las aeronaves, los pagos por los servicios de tierra, las tasas aeroportuarias, el entrenamiento y pago a sus tripulaciones, el arrendamiento de las aeronaves, los consumos generados por instalaciones generales y administrativas, entre otros costos. Por ejemplo el gasto en combustibles para las aerolíneas en 2011 fue en promedio de \$400 millones de dólares: Aerolíneas Argentinas gastó \$464 millones de dólares, la aerolínea Delta Airlines gastó \$300 millones de dólares, Avianca gastó \$380 millones de dólares, entre otras aerolíneas. En Colombia, el 76% de los costos de operación de las aerolíneas provienen de costos directos relacionados a su operación, mientras que el 24% restante de costos está relacionado con costos indirectos (AeroCivil, 2010). En la tabla a continuación se muestran los costos en los que incurrieron cuatro aerolíneas colombianas en el año 2010, en relación de porcentajes.

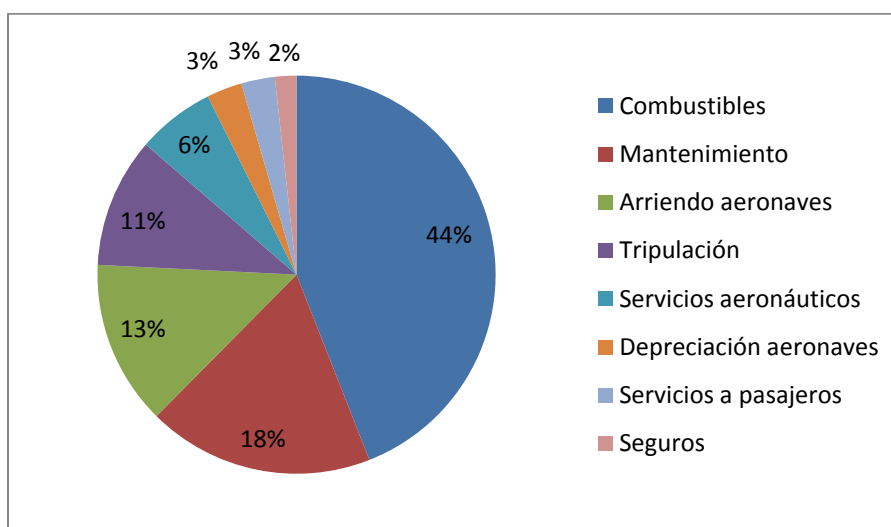
Tabla 12. Costos directos e indirectos de aerolíneas en Colombia, dados en porcentaje.

ITEM	Avianca	AeroRepública	Aires	Easyfly	Promedio
Tripulación	7.18	7.12	10.76	6.49	7.89
Seguros	0.63	1.56	1.48	1.55	1.31
Servicios aeronáuticos	4.62	4.55	4.08	5.65	4.73
Mantenimiento	11.55	8.78	26.22	8.44	13.75
Servicios a pasajeros	1.91	4.28	0.99	0.98	2.04
Combustibles	38.28	32.66	29.72	31.05	32.93
Depreciación aeronaves	2.14	0.00	0.00	6.46	2.15
Arriendo aeronaves	7.60	12.01	14.12	6.26	10.00
COSTOS DIRECTOS	73.91	70.96	87.37	66.88	74.78
Administración	6.05	9.66	12.63	6.05	8.60
Ventas	11.30	14.62	0.00	23.76	12.42
Financieros	8.74	4.76	0.00	3.31	4.20
COSTOS INDIRECTOS	26.09	29.04	12.63	33.12	25.22
COSTOS TOTALES	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Fuente: Adaptado de AeroCivil, 2010

De acuerdo a la anterior tabla es posible deducir que entre los costos directos, los combustibles y el mantenimiento son los factores de más alto impacto, con un 44% y 18%, respectivamente, del total de costos directos. Esto se muestra en la gráfica a continuación

Figura 34. Costos directos relacionados con la operación de una aeronave



Fuente: AeroCivil, 2010

Entre las alternativas planteadas anteriormente para las distintas etapas de vuelo definidas para el presente estudio, se plantearon estrategias referentes a la reducción del consumo de combustible y un mejor mantenimiento de las aeronaves.

Una mejora en las operación de la aeronave en tierra, empleando por ejemplo, el carreteo con un solo motor, puede significar un ahorro entre 5 y 10% de combustible (Balakrishnan & Hansman, 2009), reduciendo los costos relacionados a la compra de combustible mostrados en la tabla anterior del 44% al 39%, sin necesidad de realizar una inversión en tecnología, reduciendo directamente las emisiones de CO₂ generadas por la quema del combustible fósil. La presente alternativa de reducción fue explicada previamente en el capítulo “*Alternativas*”.

Tabla 13. Precio mensual keroseno en Colombia (últimos 7 meses).

Mes	Precio (COP)	Precio (USD)
Oct-11	5.663,46	2,97
Nov-11	5.837,52	3,05
Dic 2011	5.558,06	2,87
Ene 2012	5.710,16	3,09
Feb-12	5.713,41	3,21
Mar-12	5.751,21	3,26
Abr 2012	5.725,58	3,23

Fuente: EIA U. E., 2012

Si se considera que una aeronave A320 en promedio consume 10.961 libras de keroseno por vuelo, al realizar la transformación a galón como unidad de volumen se tiene que se emplean 2603.5 galones de combustible. Multiplicando por el precio del combustible por galón en abril 2012 se tiene que el costo por el combustible consumido es de \$14'906.910,96 pesos colombianos (COP) o \$8.409,51 dólares de Estados Unidos (USD) para un vuelo, con una Tasa de Cambio de \$1.772,63 pesos colombianos por un dólar del mes de abril de 2012. Aplicando el carreteo de la aeronave con un solo motor, el ahorro por vuelo estaría entre COP \$745.345,55 (USD \$420,48) y COP \$1'490.691,10 (USD \$840,95). Si se considera que una aeronave A320 realiza en promedio 2,1 vuelos diarios, el ahorro promedio mensual estaría entre COP \$46'956.769,52 (USD \$26.489,95) y COP \$93'913.539,05 (USD \$52.979,90).

Los costos relacionados al mantenimiento son también altos, debido a que este rubro incide en la estructura de costos básicamente por la importación de repuestos, partes, piezas y equipos para realizar el mantenimiento de las aeronaves (Flight Safety Foundation, 2010). Los costos del mantenimiento podrían ser reducidos si se cuenta con una mayor cantidad de partes y piezas en almacén, pues no se requeriría importarlas todas. De igual forma un mantenimiento preventivo llevado meticulosamente, prolonga la vida útil de la aeronave, permitiendo que ésta permanezca mayor tiempo en vuelo y no en tierra. Además hay otras medidas como cambiar los libros y manuales de mantenimiento en papel por archivos digitales, como Lufthansa, ahorrando 2,5 toneladas de papel y tiempos totales de 650 horas por año en el proceso de mantenimiento. Estos costos podrían reducirse hasta en un 12% (AeroAstro, 2007) con un adecuado mantenimiento preventivo de las aeronaves.

Las alternativas presentadas para la reducción de emisiones de CO₂ relacionadas con la aviación en Colombia se resumen en la tabla a continuación, indicando un valor estimado de inversión para cada una de ellas. Dichas alternativas fueron explicadas con mayor detalle en el capítulo “Alternativas”

Tabla 14. Costo y aplicabilidad de las alternativas de reducción de emisiones de CO₂

Alternativa	Costo	Aplicabilidad
Gestión adecuada del mantenimiento	Mantenimiento preventivo reduce costos en un 12% (AeroAstro, 2007)	Corto plazo
Mejoramiento del factor de carga de la aeronave	Mayor carga genera menos emisiones asignadas a la carga transportada (The Low Carbon Economy Ltd, 2006 - 2012)	Depende de las relaciones externas de la empresa – Corto plazo
Monitoreo y control de consumo de combustible y otros parámetros de operación	USD \$5.000 – Equipos y capacitación (Flight Safety Foundation, 2010)	Corto plazo
Control de tráfico aéreo eficiente	USD \$4.500 – Capacitación a tripulación y controladores aéreos	Inmediata
Pilotaje eficiente	USD \$4.500 Equipo y curso (Deuman, 2010)	Corto plazo
Modernización de la flota	A320 – USD \$88'300.000 (compra) A320 – USD \$1'250.000 (arriendo/mes) (Airbus, 2012)	Depende del músculo financiero de la empresa – Mediano y largo plazo
Combustibles alternativos	Los costos están relacionados al desarrollo de dichos combustibles (Hileman, y otros, 2009)	Necesita desarrollo – Largo plazo
Optimización de rutas aeronáuticas colombianas	N/A	Necesita desarrollo – Mediano y largo plazo

Fuente: Elaboración propia

7.5 MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE RUTAS AERONÁUTICAS – DESARROLLO EN FASE BÁSICA

El presente capítulo se presenta como una propuesta a la optimización de las rutas aeronáuticas en Colombia, proponiéndose el desarrollo de un modelo matemático basado en el modelo meta-heurístico de la colonia de hormigas. Esta propuesta de modelo se presenta en un desarrollo básico pues no es el núcleo del presente proyecto de investigación, sin embargo posteriormente se puede continuar por parte de otras personas la investigación sobre el tema y llevar a cabo el desarrollo del modelo.

La optimización se define como el proceso mediante el cual se “intenta dar respuesta a un tipo general de problemas matemáticos donde se desea elegir el mejor entre un conjunto de elementos” (Taha, 2003). La optimización significa la minimización de tiempo, costos y riesgo, o también la maximización de los ingresos, calidad y la eficiencia en un determinado proceso aplicado en una industria. Con la presente propuesta de modelo matemático se pretende optimizar ciertas rutas actuales de aeronavegación en el territorio colombiano, es decir, dentro del conjunto de posibles soluciones o rutas aeronáuticas, escoger aquellas que tienen un menor impacto ambiental.

Los meta heurísticos, en su definición original, son métodos de soluciones que orquestan una interacción entre procedimientos de mejora local y estrategias de nivel superior para crear procesos capaces de salir de un óptimo local y realizar una búsqueda más robusta en un espacio de solución (Gendreau & Potvin, 2010). La palabra *heurística* tiene su origen en la palabra griega *heuriskein* que significa “el arte de descubrir nuevas estrategias para resolver problemas”. El sufijo *meta*, también es una palabra griega cuyo significado es “una metodología de nivel superior” (Talbi, 2009) Con ello se puede definir los métodos meta heurísticos como “las metodologías generales de nivel superior que pueden ser utilizadas como estrategias guía para diseñar heurísticos para resolver problemas específicos de optimización” (Talbi, 2009)

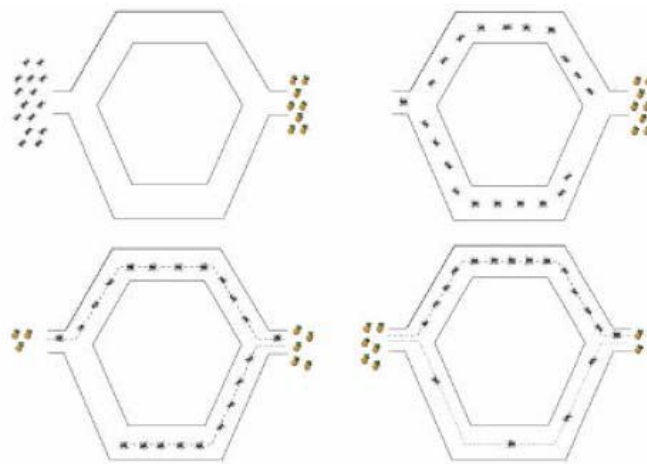
Cuando se busca dar una solución a un problema, usualmente se encuentran buenas soluciones, obtenidas a partir del uso de algoritmos del tipo heurístico o meta heurístico. Los algoritmos meta

heurísticos ofrecen una “solución aceptable en un tiempo razonable” (Talbi, 2009) razón por la cual estos algoritmos son utilizados en diversas aplicaciones en la industria, a pesar de no garantizar que la solución encontrada sea la óptima.

Entre los meta heurísticos que actualmente son empleados en la industria se cuentan: Problema del Agente Viajero (TSP), Algoritmos Voraces (Greedy), Búsqueda Tabú, Algoritmos de Búsqueda Local, Templado Simulado, GRASP, Algoritmos Genéticos, Algoritmo de Dispersión de Partículas (PSO), Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO), entre otros. Para el presente proyecto se empleará el algoritmo de colonia de hormigas.

El algoritmo de colonia de hormigas (Ant Colony Optimization - ACO) tiene como característica principal el simular el comportamiento que tienen las hormigas en la naturaleza, las cuales, en su búsqueda de alimento, trazan un camino que es seguido por otras hormigas, siempre y cuando dicho camino sea más corto que otros que han sido ya explorados (Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999). Al pasar el tiempo, las hormigas se encuentran que el rastro más fuerte de las feromonas se encuentra en el camino más corto, razón por la cual, al momento de tomar la decisión de qué camino tomar, la hormiga buscará seguir aquel camino, optimizando el tiempo y distancia a recorrer. En la Figura 16 se muestra el comportamiento de la colonia de hormigas al buscar el camino más corto.

Figura 35. Comportamiento de colonia de hormigas al encontrar el camino más corto.



Fuente. Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999

En analogía con el ejemplo biológico, el ACO se basa en la comunicación indirecta dentro de la colonia por medio de agentes simples, llamados hormigas (artificiales), que se comunican mediante caminos de feromonas (artificiales). Dichos caminos de feromonas en ACO sirven como una información numérica distribuida, la cual emplean las hormigas para construir soluciones en forma probabilística al problema que se intenta resolver y, al cual, las hormigas se adaptan durante la ejecución del algoritmo de acuerdo a su experiencia de búsqueda. (Dorigo & Stützle, 2010)

La optimización empleando un método meta heurístico ACO ha sido utilizada en algunas aplicaciones para resolver problemas en distintas industrias, tales como: Ordenamiento secuencial, programación, TSP probabilístico, equilibrio de línea de ensamble, 2D-NP plegamiento de proteínas, secuencia de ADN, ligado y acoplamiento de proteínas y conmutación de paquetes para enrutamiento de redes tipo internet.

El problema identificado para realizar el presente planteamiento se refiere a las altas emisiones generadas por las aeronaves en las rutas aeronáuticas actuales en el territorio colombiano, debido a que las rutas actuales *“no permiten aprovechar la tecnología de las aeronaves nuevas, puesto que están diseñadas para operar con tecnología no de punta”* (Rivera, 2010)

Las variables identificadas para este modelo fueron

- Independientes: Ruta.
- Dependientes: Distancia, consumo combustible, punto salida, punto de llegada

d_{ij}^k = distancia o paso de movimiento de la hormiga por iteración

i= nodo de salida

j= nodo de llegada

k= número de iteración

El pseudo código propuesto para el desarrollo del modelo se presenta a continuación:

Pasos para el pseudo código

1. Identificar el punto de salida y el punto de llegada
2. Identificar la malla para el paso de la hormiga

-
3. Identificar el valor que va a tomar marginalmente la función objetivo debido al paso por determinado cuadro en la malla.
 4. Empezar a iterar
 - 4.1. Indicar el paso en la iteración k
 - 4.2. Identificar los grados de movilidad
 - 4.3. Realizar simulación Montecarlo para verificar el movimiento a realizar
 - 4.4. Realizar movimiento
 - 4.5. Iterar hasta que se encuentre en un radio permitido de aproximación
 5. Repetir hasta llegar a destino.

El código desarrollado para el presente modelamiento matemático fue realizado gracias a la colaboración de dos docentes de la Pontificia Universidad Javeriana y mediante la ayuda de Visual C# de Microsoft® Visual Studio 2008. En dicho código se incluyen las restricciones referentes a las altitudes geográficas, al número de nodos de la malla, el tipo de aeronave, consumo de combustible, cantidad máxima de combustible, distancia entre las ciudades (partida y destino) y la velocidad de la aeronave. A continuación se presenta el código desarrollado para el presente modelamiento matemático en fase básica:

1. Restricciones y Variables

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Collections;
using System.Linq;
using System.Text;

namespace ACO_Planes.ACO
{
    public struct Avion
    {
        public int _tipo;
        public double _max_gas;
        public double _consumo_gas;
        public double _velocidad;
    }

    public class CAnt
    {
        public double _distancia_recorrida;
        public double _gas_utilizada;
        public double _velocidad_promedio;
    }
}
```

```

public int[] _posicion, _origen, _destino;
public Avion _avion;
public ArrayList _ruta;

//Constructor
public CAnt(int origenX, int origenY, int destinoX, int destinoY)
{
    _distancia_recorrida = 0;
    _gas_utilizada = 0;
    _velocidad_promedio = 0;
    _ruta = new ArrayList();
    _posicion = new int[2];
    _origen = new int[2];
    _destino = new int[2];

    _origen[0] = origenX;
    _origen[1] = origenY;

    _posicion[0] = origenX;
    _posicion[1] = origenY;

    _destino[0] = destinoX;
    _destino[1] = destinoY;
}

//Calcular siguiente punto de recorrido
public void SiguienteSalto()
{
    //Determinar la forma en que se hace el salto entre
posiciones
    //Calcular distancias
    //Actualizar consumo de combustible
    //Actualizar ruta
}
}
}

```

2. Generación de colonia de Hormigas y Malla de movimiento

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Collections;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.IO;

namespace ACO_Planes.ACO
{
    public class CACO
    {
        double[,] _malla;
        ArrayList _aviones, _hormigas;
        bool _error;
    }
}

```



```

long _num_hormigas;

//Constructor
public CACO(long h)
{
    _aviones = new ArrayList();
    _hormigas = new ArrayList();
    _num_hormigas = h;
    _error = false;
}

//Cargar datos de malla y aviones desde un archivo plano
public void CargarDatos(string path)
{
    try
    {
        double distancia, WCelda, HCelda;
        int WMalla, HMalla;
        string[] aux;
        string line;
        Avion a;
        TextReader tr = new StreamReader(path);

        //Leer distancia de Origen a Destino
        distancia = Double.Parse(tr.ReadLine());

        //Leer alto y ancho de celda
        WCelda = Double.Parse(tr.ReadLine());
        HCelda = Double.Parse(tr.ReadLine());

        //Leer datos de avión y guardarlos en la colección de
aviones
        while (tr.Peek() != -1)
        {
            line = tr.ReadLine();
            aux = line.Split(';');
            a._tipo = Int32.Parse(aux[0]);
            a._consumo_gas = Double.Parse(aux[1]);
            a._max_gas = Double.Parse(aux[2]);
            a._velocidad = Double.Parse(aux[3]);
            _aviones.Add(a);
        }

        //Crear malla de recorrido
        HMalla = (int)(distancia / HCelda);
        WMalla = (int)(distancia / WCelda);
        _malla = new double[HMalla, WMalla];

        //Cargar datos en la malla de acuerdo al SIG disponible
    }
    catch (Exception e)
    {
        _error = true;
        throw (e);
    }
}

```

```
static void Main(string[] args)
{
    long h;
    h = Int64.Parse(args[1]);
    ACO.CACO x = new ACO.CACO(h);

    x.CargarDatos(@"C:\entrada.txt");
    x.Ejecutar();
    x.GuardarDatos(@"C:\salida.txt");
}
}
```

Los ahorros que se pretenden generar con el presente modelo están relacionados a la disminución del combustible consumido, debido a la reducción del tiempo empleado para el cruce de las aeronaves, disminuyendo las emisiones de GEI en forma proporcional.

Se pretende emplear las 3 rutas aeronáuticas nacionales principales de Colombia con el fin de realizar un estudio comparativo entre los consumos de las aeronaves con las rutas actuales y los consumos con las rutas optimizadas propuestas.

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS RECOMENDACIONES

La investigación realizada presenta un análisis de huella de carbono con enfoque de ciclo de vida, aplicado para dos aeronaves con presencia en la aviación civil colombiana. El análisis consiste en la evaluación del impacto ambiental, dado en unidades de CO₂e proveniente de las emisiones de gases de efecto invernadero de las aeronaves durante las cuatro etapas consideradas para el presente estudio.

El estudio requirió de una gran cantidad de datos, dada la complejidad de los procesos relacionados con las distintas etapas consideradas para las aeronaves. Para obtener la información referente se realizaron distintas visitas de campo a la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil (AeroCivil), oficina de Transporte, oficina de Registro y Matrícula, oficina de Ingeniería de operaciones y Centro Nacional de Aeronavegación. Debido a que no toda la información necesaria para realizar el presente estudio se encontraba disponible directamente desde la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil, algunos datos debieron ser tomados de bases de datos y distintas fuentes, como entrevistas realizadas a expertos y conocedores del tema, cuyos nombres se omiten por motivos de confidencialidad y privacidad de los datos.

Debido a la extensión de la información necesaria para realizar un análisis de huella de carbono con el ciclo de vida completo de la aeronave, se establecieron los límites, alcances y procesos a considerar para el presente estudio. La recopilación de los datos disponibles en la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil ayudaron a delimitar el estudio, permitiendo modelar el análisis de huella de carbono con alto detalle.

Los resultados del análisis en la fabricación de la aeronave, así como los de la fabricación del hangar de mantenimiento, la extracción y refinación del combustible, la producción del aceite y la generación eléctrica, fueron obtenidos mediante el uso de Umberto® a partir de la base de datos de Ecoinvent. Se encontró que las emisiones referentes a la fabricación de la infraestructura de mantenimiento y las referentes a la fabricación de la aeronave son relativamente bajas en comparación con las emisiones generadas por la operación de la aeronave.

Respecto a la unidad funcional adoptada (g CO₂e por pasajero), teniendo en cuenta la contabilización de los gases de efecto invernadero provenientes de la fabricación y operación de las aeronaves, es claro que el proceso de combustión del combustible keroseno es el proceso más dañino en todas las categorías ambientales por ser el que más aporta emisiones de gases de efecto invernadero. Se encontró también que el proceso de mantenimiento, considerado de no tan alto aporte previo al presente estudio, tiene un mayor impacto en los impactos ambientales de la aeronave debido al consumo de energía y de combustibles empleados en dicho proceso. De acuerdo a la literatura se encontró que el proceso de fabricación de las aeronaves cuenta con una tecnología similar, sin embargo, para realizar las asignaciones de emisiones de CO₂ para cada aeronave se tuvieron en cuenta las distancias de los proveedores de materias primas y productos terminados hacia el lugar de ensamblaje de las aeronaves. Cabe recalcar que al realizar la interpretación de dichos resultados es necesario tener en cuenta que, para el presente estudio, se asumieron datos e incertidumbres provenientes de la base de datos de Ecoinvent que se emplearon para modelar la fase de construcción de las instalaciones y la fase de fabricación de la aeronave.

Aunque el cambio climático es la categoría ambiental más discutida con respecto a los impactos ambientales provenientes de la aviación, se deben analizar otras categorías con el fin de tener certeza sobre la importancia de este impacto. De acuerdo a lo revisado en el sub capítulo “la aviación y los gases de efecto invernadero” y el capítulo “Impactos ambientales y alternativas de reducción”, se encontró que la investigación referente a los impactos de la aviación en el medio ambiente, han sido estudiados y determinados a modo general. El presente estudio está enfocado a contabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero en términos de CO₂e y proponer alternativas para la reducción de las mismas. Se encontró que el nivel de emisiones generadas por las dos aeronaves en Colombia se encuentra cercano a los estándares internacionales. A futuro se recomienda realizar otros estudios sobre los distintos impactos ambientales relacionados con la formación de material particulado y efectos tóxicos sobre el ser humano, con el fin de tener un panorama general y completo acerca de los efectos totales de la aviación.

Dado que la mayoría de los impactos ambientales de la aeronave proviene del consumo de combustible keroseno y sus emisiones al aire dados por el proceso de quema del combustible, se hace evidente que la forma más efectiva para mejorar el rendimiento ambiental de la aviación es

mediante la reducción del combustible consumido. Esta reducción se puede dar a través de procedimientos de pilotaje más eficientes, procedimientos de carreteo con un solo motor, control de tráfico aéreo más eficiente, disminución de emisiones por parte de los motores, uso de combustibles alternativos, entre otras alternativas aplicables al caso de estudio, planteadas en el capítulo “Impactos ambientales y alternativas de reducción”. El fabricante de aeronaves Boeing ha estimado que al mezclar el keroseno con biodiesel proveniente de algas podrían reducirse las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 60 y 80 por ciento (González, 2008). De igual forma la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) ha planteado la meta a sus miembros para que utilicen al menos 10% de combustibles alternativos en el año 2017 (IATA, 2009). Se plantea seguir profundizando en las alternativas propuestas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, aplicables en el corto y mediano plazo para la aviación en Colombia.

La tecnología de las dos aeronaves empleadas en el presente estudio juega un papel importante en el cálculo de las emisiones generadas por cada una de las aeronaves. El mayor consumo de combustible para una aeronave con tecnología más antigua resulta en una mayor cantidad de emisiones generadas en su etapa de operación, comparado con la aeronave de tecnología más reciente que incluye motores más eficientes, consumo promedio menor de combustible, mayor autonomía y un rango mayor. Sin embargo se encontró que las emisiones por pasajero.km transportado, dadas las condiciones de las aeronaves explicadas en el capítulo “Impactos ambientales y alternativas de reducción” son equivalentes para ambas aeronaves, ubicándose en un 4,27% por encima de la media internacional de emisiones. Se halló también que en el caso de las emisiones por pasajero transportado, las provenientes de la aeronave Boeing B727 se encuentran en un 96.18% por encima de la aeronave Airbus A320. De igual forma, se observó que las emisiones por kilómetro recorrido de la aeronave Boeing B727 son superiores en 14% a las de la aeronave Airbus A320.

El presente trabajo aborda las preocupaciones ambientales del sector aeronáutico, utilizando el análisis de huella de carbono con enfoque de ciclo de vida para analizar el impacto ambiental de las aeronaves Boeing B727 y Airbus A320 en el contexto de la aviación colombiana.

9. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el aporte de las emisiones de GEIs por actividad aeronáutica, principalmente de aeronaves del tipo turbo reactores, al potencial impacto en calentamiento global en Colombia?

10. METODOLOGÍA

10.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo cuantitativo, soportada por definiciones conceptuales y regulaciones en la aviación internacional emitidas principalmente por parte de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), encaminadas a la medición y reducción de niveles de contaminación de la industria aeronáutica. De manera específica, la normativa que se empleó para la realización del presente estudio va enmarcada dentro del conjunto de normas y métodos internacionales dados por la OACI en su *Anexo 16, volumen II, sobre Protección del Medio Ambiente: Emisiones de los motores en las aeronaves*. Para el presente estudio se realizó un análisis de las distintas metodologías empleadas para el cálculo de huella de carbono, escogiéndose y aplicándose la metodología de IPCC.

10.2 CAMPO DE APLICACIÓN

El presente estudio tuvo en cuenta los datos para las 7 rutas aeronáuticas principales en Colombia, con una población de dos aeronaves con motores turbo reactores empleados para propulsar aeronaves de matrícula colombiana exclusivamente a velocidades subsónicas que operan desde la ciudad de Bogotá. Los datos empleados para el cálculo de la huella de carbono promedio de un vuelo en un trayecto, fueron escogidos de acuerdo a la cantidad de combustible necesaria para realizar la operación.

10.3 SELECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

La toma de datos se estructuró dividiendo el sistema bajo estudio en subsistemas, de acuerdo a la operación de la aeronave: Aeronave, Prevuelo, Vuelo, Posvuelo. Los datos fueron recopilados y promediados con la ayuda de la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil (UAEAC) para el año 2011. Las variables consideradas independientes para el presente estudio fueron las dos aeronaves. Se consideraron como variables dependientes la distancia, el combustible, la energía, los consumibles empleados.

Para el presente estudio se emplearon dos tipos de aeronaves turboreactor: Boeing 727 y Airbus A320. Para realizar la selección de las aeronaves, se tuvo en cuenta las 2.033 aeronaves vigentes en el territorio colombiano, escogiendo finalmente a los dos fabricantes de aeronaves: Boeing, con 73 aeronaves (modelos: 767, 757, 767, 737, 727 y 707), y Airbus con 48 aeronaves (modelos: A330, A320, A319 y A318). Para que la muestra fuera representativa y equivalente entre las dos aeronaves, se tomaron 25 aeronaves de Boeing modelo 727, y 28 aeronaves de Airbus modelo A320. Para cada una de las aeronaves se consideraron los siguientes parámetros: combustible consumido en la ruta, energía utilizada para encendido de la aeronave, consumibles en el mantenimiento de la aeronave. Para las aeronaves se consideraron en promedio 79 vuelos mensuales para la aeronave Boeing B727 y 62 vuelos mensuales para la aeronave Airbus A320.

Para la recolección de datos de las aeronaves se realizaron visitas de campo a la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil, oficina de Transporte, oficina de Registro y Matrícula, oficina de Ingeniería de operaciones y Centro Nacional de Aeronavegación.

El software Umberto es capaz de realizar cálculos útiles y de mostrar los resultados en una forma rápida y organizada. Sin embargo, la mayor riqueza del software proviene de las bases de datos que emplea, indispensables para su funcionamiento y uso. Las bases de datos de soporte al software fueron empleadas debido al amplio contenido de datos. Para el presente estudio se empleó la base de datos de Ecoinvent, la cual contiene más de 400 Impactos de ciclo de vida aplicables a distintas áreas, como abastecimiento de energía, manejo de desperdicios, transporte, construcción, ingeniería mecánica, entre otros. Esta base de datos fue desarrollada en un esfuerzo conjunto de varias instituciones suizas, y basándose en datos de la industria, se ha convertido en la base de datos más empleada y conocida para los inventarios de ciclo de vida (Althaus, y otros, 2007). Dada el amplio rango de procesos que componen la base de datos de Ecoinvent y su confiabilidad, se empleó esta base de datos con el software Umberto para el presente estudio.

Las emisiones se calcularon teniendo como unidad de medida las emisiones de gases de efecto invernadero en kg de CO₂ equivalente (IPCC, 2007). Teniendo los datos del inventario en unidades de Kilogramos (Kg) de combustible empleado para realizar un vuelo, se procedió a realizar la cuantificación de las emisiones de CO₂. De igual forma, para el consumo energético, se procedió a realizar la cuantificación de la energía consumida en unidades de Kilovatios hora (Kwh) y se

empleó el factor de emisión dado por la Agencia Internacional de Energía, para obtener las emisiones en términos de CO₂ equivalente.

Para la fabricación de la aeronave se realizó la asignación de las emisiones de acuerdo a la vida útil promedio de la aeronave y la cantidad de vuelos promedio realizados en el año para encontrar las emisiones asignadas a un pasajero abordo de la aeronave. De la misma forma se realizó la asignación de la producción del hangar de acuerdo a la vida útil de sus materiales y el número de vuelos realizados en el año, asignando las emisiones a un vuelo por día. La vida útil de los materiales se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 15. Vida útil materiales empleados

Material	Vida útil (años)	Fuente
Aluminio	50	Cuchí, 2003
Concreto	20	Cuchí, 2003
Acero	20	GreenSpec, 2012
Avión comercial	30	Airbus, 2012 y Boeing, 2012

Fuente: Elaboración propia

10.4 RECURSOS

Los recursos necesarios para la realización del presente proyecto se dividieron en tres partes: equipos técnicos y software, información necesaria para la realización del proyecto, capacitación en el uso de software y análisis de huella de carbono.

Los equipos técnicos y software específicos utilizados son:

- a) Software Umberto, empleado para análisis de ciclo de vida.
- b) Microsoft Excel, empleado para realizar los cálculos de análisis de huella de carbono.

Los recursos referentes a la información necesaria se detallan en la bibliografía sugerida para consulta. Sin embargo es mandatorio el uso del *Anexo 16 volumen II* de la OACI como herramienta principal de consulta en el tema de emisión de los motores en las aeronaves.

Bibliografía

- AENA. (2011). *Aena Aeropuertos*. Recuperado el 01 de 05 de 2012, de <http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite/sostenibilidad/es/Page/1237548048942//Energias-renovables.html>
- AeroAstro. (2007). *Reducing airport surface operation environmental impacts*. Massachusetts: MIT.
- AeroCivil. (2010). *Boletín Estadístico año 2010*. Bogotá: U.A.E.A.C.
- AeroCivil. (2012). *UNIDAD DE GESTIÓN DE AFLUENCIA DE TRÁNSITO AÉREO: Reporte Mensual*. Bogotá: U.A.E.A.C.
- Airbus. (2012). *Airbus, an EADS Company*. Recuperado el 03 de 05 de 2012, de <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/>
- Airport Carbon Accreditation. (2009). *Airport Carbon Accreditation*. Recuperado el 20 de 09 de 2010, de <http://www.airportcarbonaccreditation.org/process/introduction.html>
- Allaire, D., & Willcox, K. (2010). *Surrogate Modeling for Uncertainty Assessment with Application to Aviation Environmental System Models*. Massachusetts: AIAA.
- Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hirsch, R., y otros. (2007). *Ecoinvent - overview and methodology*. Berna: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- ATR Aircraft. (2011). *ATR, Avions de Transport Régional - Groupement d'intérêt économique (GIE), An Alenia Aermacchi and EADS joint Venture*. Recuperado el 03 de 05 de 2012, de <http://www.atraircraft.com/products/atr-72-500.html>
- Balakrishnan, H., & Hansman, R. J. (2009). *REDUCING AIRPORT SURFACE OPERATION ENVIRONMENTAL IMPACTS*. Massachusetts Institute of Technology.
- Balsano, J. (1998). *Guidelines and formulation of an upgrade source emission model for atmospheric pollutants*. Southampton, UK: WIT Press.
- Bartis, J. T., Camm, F., & Ortiz, D. S. (2008). *Producing Liquid Fuels from Coal: Prospects and Policy Issues*. Santa Monica: RAND Corporation.
- Berra, G., & Finster, L. (2010). Emisión de Gases de Efecto Invernadero. *IdiaXXI*, 212-215.
- Boeing. (2012). *Boeing*. Recuperado el 05 de 05 de 2012, de <http://www.boeing.com/commercial/727family/index.html>
- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York: Oxford University Press.

-
- Bows, A., Anderson, K., & Wood, F. (2010). *Apportioning aviation CO2 emissions to regional administrations for monitoring and target setting*. Recuperado el 30 de 08 de 2010, de www.elsevier.com/locate/tranpol
- Bruntland et al. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: "Our common future"*. United Nations.
- Carbon Clear. (2011). *PAS 2060: The first standard for Carbon Neutrality*. The British Standards Institution.
- Carbon Trust. (2007). *Carbon Footprint Measurement Methodology*. Carbon Trust.
- Carbon Trust UK. (2008). *Carbon Trust*. Recuperado el 30 de 08 de 2010, de <http://www.carbontrust.co.uk/cut-carbon-reduce-costs/calculate/carbon-footprinting/Pages/carbon-footprinting.aspx>
- Carney, S. (2006). *The development and application of a stakeholder led approach for both estimating and exploring the potential of greenhouse gas emission mitigation on the government office regional scale*. Manchester: Manchester Business School.
- CEPAL, C. E. (2010). *Comisión Económica para la América Latina y el Caribe*. Recuperado el 30 de 10 de 2010, de <http://www.learnaboutcarbon.net/qa/which-initiatives-are-driving-development-product-carbon-footprints>.
- Cuchí, A. (2003). Los flujos de energía en la edificación. *Acercamiento a criterios arquitectónicos ambientales para comunidades aisladas en áreas naturales protegidas de Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, México.: Universidad Autónoma de Chiapas.
- Dakhel, P., Lukachko, S., Waitz, I., Miake-Lye, R., & Brown, R. (2005). Postcombustion evolution of soot properties in an aircraft engine. *Proceedings of GT 2005 ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air*, 1-9.
- DEFRA, D. f. (2010). *Carbon Emission Assumptions*. DEFRA.
- Deuman. (2010). *Diseño modelo de capacitación conducción eficiente*. Santiago de Chile.
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2010). *Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances*. Bruselas: Université Libre de Bruxelles (ULB).
- EEA, E. E. (2007). *Annual european community greenhouse gas inventory 1990 to 2005 and inventory report 2007*. European Environmental Agency.
- EIA, E. I. (2000). *The Transition to Ultra-Low-Sulfur Diesel Fuel: Effects on Prices and Supply*. Washington: Energy Information Administration.
- EIA, U. E. (2012). *Index Mundi*. Recuperado el 20 de 05 de 2012, de <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gasolina-de-aviacion>

-
- Embraer. (2011). *Embraer*. Recuperado el 03 de 05 de 2012, de <http://www.embraer.com/en-US/Aeronaves/Pages/Home.aspx>
- EPA, E. P. (2000). *Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Fuel Sulfur Control Requirements*. Washington DC: Environmental Protection Agency.
- Ewing, B., Goldfinger, S., Wackernagel, M., Stechbart, M., Rizk, S. M., Reed, A., y otros. (2008). *The Ecological Footprint Atlas 2008*. Global Footprint Network, Research and Standards Department.
- Flight Safety Foundation. (2010). *Basic Aviation Risk Standard*. New York: Flight Safety Foundation Limited.
- Forster, P., Shine, K., & Stuber, N. (2007). It is premature to include non-CO2 effects of aviation in emission trading schemes. *Atmos. Environ.*, 1117-1121.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., & et al. (2003). *Implementation of life cycle impact assessment methods: final report ecoinvent 2000*. Berna: Swiss Centre for LCI.
- Fuglestvedt, J., Shine, K., Berntsen, T., Cook, J., Lee, D., Stenke, A., y otros. (2009). *Transport impacts on Atmosphere and Climate: Metrics*.
- Fundación Terra. (15 de 05 de 2008). *Terra.org*. Recuperado el 26 de 08 de 2010, de <http://www.terra.org/articulos/art02095.html>
- Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2010). *Handbook of metaheuristics*. New York: Springer.
- GHG Protocol. (2011). *Quantifying the greenhouse gas emissions of products, PAS 2050 & the GHG Protocol Product Standard*. GHG Protocol Product Standard.
- GIACC. (2009). *GROUP ON INTERNATIONAL AVIATION AND CLIMATE CHANGE (GIACC) - Aviation and climate change*. Montreal.
- González, Á. (2008). *To go green in jet fuel, boeing looks at algae*. Seattle: Seattle Times.
- Greater London Authority. (2003). *London Atmospheric Emissions Inventory*. Londres, UK.
- GreenSpec. (2012). *GreenSpec®*. Recuperado el 21 de 05 de 2012, de GreenSpec is Data Protection Act (DPA) registered: http://www.greenspec.co.uk/html/materials/embodyed_energy.html
- Grupo de Mitigación de Cambio Climático. (2009). *La Huella de Carbono en los Bienes y Servicios Agroalimentarios: Una contribución a la lucha contra el cambio climático. SECTOR AGROALIMENTARIO FRENTE A LA HUELLA DE CARBONO*. Santiago de Chile.

-
- Guinée, J. B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, R., Koning, d., y otros. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards*. Paris: Kluwer Academic Publishers.
- Guinée, J., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, R., de Koning, A., y otros. (2002). *Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards*. Leiden, The Netherlands: Centre of Environmental Science.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Nazarenko, L., Lacis, A., Schmidt, G., y otros. (2005). *Efficacy of climate forcings*. *J. Geophys.*
- Herrera M, N. (05 de 2010). *Responsabilidad Social Empresarial, La República*. Recuperado el 20 de 08 de 2010, de http://issuu.com/diario_larepublica/docs/rse20100527?mode=a_p
- Hileman, J. I., Ortiz, D. S., Bartis, J. T., Wong, H. M., Donohoo, P. E., Weiss, M. A., y otros. (2009). *Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels*. Santa Monica: RAND Corporation.
- Hileman, J., & Donohoo, P. (2009). Energy Content and Alternative Jet Fuel Viability. *Journal of Propulsion and Power*.
- IATA. (08 de 12 de 2009). *Aviación Digital Global*. Recuperado el 19 de 08 de 2010, de <http://www.aviaciondigitalglobal.com/noticia.asp?NotId=11754&NotDesignId=4>
- IATA. (2012). *Guidance Material and Best Practices for Pilot Aptitude Test*. Montreal: IATA.
- ICAO. (08 de 10 de 2004). *International Civil Aviation Organization*. Recuperado el 30 de 08 de 2010, de <http://www.icao.int/icao/en/env/a35-5.pdf>
- ICAO. (2008). *Anexo 16 - Protección del Medio Ambiente Volumen II: Emisiones de los motores de las aeronaves*. Montreal: Organización de Aviación Civil Internacional.
- ICAO. (2011). *Aviation and sustainability*. Montreal: ICAO.
- International Transport Forum. (2009). *Reducing transport GHG emissions: opportunities and cost*. Paris.
- IPCC. (1996). *The Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*. Recuperado el 15 de 09 de 2010, de <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
- IPCC. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. (2000). *The Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*. Recuperado el 30 de 08 de 2010, de Aircraft Emissions. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_5_Aircraft.pdf

-
- IPCC. (2001). *IPCC Third Assessment Report*. Recuperado el 04 de 11 de 2010, de http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/518.htm
- IPCC. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report*. IPCC.
- ISO. (2009). *Environmental management: The ISO 14000 family of International Standards*. Genova, Suiza: ISO Central Secretariat.
- ISO, I. O. (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Genova, Switzerland: ISO International Standard.
- Jensen, E., & Toon, O. (1997). The potential impact of soot particles from aircraft exhaust on cirrus clouds. *Geophys*, 249-252.
- KLM. (2012). *KLM - Royal Dutch Airlines*. Recuperado el 20 de 04 de 2012, de http://www.klm.com/travel/travel_es/about/co2/klmdoing/plan.htm
- La República. (05 de 2010). *Responsabilidad Social Empresarial, La República*. Recuperado el 20 de 08 de 2010, de http://issuu.com/diario_larepublica/docs/rse20100527?mode=a_p
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C., Lim, L. L., y otros. (2008). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 3520-3537.
- Lee, D., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J., Petzold, A., y otros. (2009). Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, 4678–4734.
- Lewis, J., Niedzwiecki, R., Bahr, D., Bullock, S., Cumpsty, N., Dodds, W., y otros. (1999). *Aircraft technology and its relation to emissions*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Martineau, M., Bell, R., MacCourt, B., Johnson, B., & Pawley, B. (2011). *Total Fuel Management*. Total Fuel Management Aviation Inc.
- Mason, K., & Miyoshi, C. (2009). *Airline Business Models and their respective carbon footprint: Final Report*. London: Cranfield University.
- Morse, G. (2009). *Investigating F.O.D. Damage*. Layton: Failure Analysis Service Technology.
- Oh, X. (2010). Greenhouse Gas Management at Airports. *Aviation's contribution to climate change*, 15-19.
- ONU. (2000). *Centro de Información de las Naciones Unidas*. Recuperado el 04 de 05 de 2012, de <http://www.cinu.org.mx/temas/desarrollo/desecon/transporte.htm>
- Parrado, C. A., & Bojacá, C. R. (s.f.). *Life Cycle Assesment and its implications on the corporate social responsibility of the cut roses supply chain in Colombia*. Chía, Colombia: Centro de Investigacions y Asesorías Agroindustriales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

-
- PAS 2050. (2008). *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Carbon Trust.
- Peace, H., & McCubbin, I. (2005). *Greenhouse Gas Emissions Study Update*. Cheshire, UK: AEA Technology for 4NW.
- Penner, J., Chen, Y., & Wang, M. L. (2009). Possible influence of anthropogenic aerosols on cirrus clouds and anthropogenic forcing. *Atmos. Chem. Phys*, 879-895.
- Petzold, A. S. (1998). Elemental composition and morphology of ice-crystal residual particles in cirrus clouds and contrails. *Atmos. Res.*, 21-34.
- Ramey, D. E., & Yang, S.-T. (2005). Production of Butyric Acid and Butanol from Biomass. *DOE*.
- Ramírez Treviño, A., Sánchez Núñez, J. M., & García Camacho, A. (2004). Ramírez Treviño, Alfredo; Sánchez Núñez, Juan Manuel; García Camacho, Alejandro. *Revista del Centro de Investigación. Universidad La Salle*, 55-59.
- Rivera, E. (15 de 10 de 2010). (D. Hidalgo, Entrevistador)
- Rivera, E. (2012). (D. Hidalgo, Entrevistador)
- Romano, D., Gaudio, D., & De Lauretis, R. (1997). *Aircraft Emissions: A comparison of methodologies based on different data availability*. Roma: ENEA Casaccia.
- Romano, D., Gaudio, D., & De Lauretis, R. (1997). *Aircraft Emissions: A comparison of methodologies based on different data availability*. Roma: Casaccia Environment Department.
- Roy, P., Nei, D., Okadome, H., Nakaruma, N., Orikasa, T., & Shiina, T. (1986). Life cycle inventory analysis for fresh tomato distribution systems in Japan considering the quality aspect. *Journal of Food Engineering*, 225-233.
- Rypdal, K. (2001). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*.
- SAIC, S. A. (2006). *Life cycle assessment: Principles and Practices*. Washington: Environmental Protection Agency.
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2010). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., y otros. (2008). Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, Vol. 319, No. 5867, 1228–1240.

-
- Spannagle, M. (2006). *A Comparison of ISO 14064 Part 1 and the GHG Protocol Corporate Module*. ISOTC207/WG5.
- Spicer, C., Holdren, M., Riggan, R., & Lyon, T. (1994). Chemical composition and photochemical reactivity of exhaust from aircraft turbine engines. *Geophysicae*, 944-955.
- Stuber, N., & Forster, P. (2007). The impact of diurnal variations of air traffic on contrail radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys*, 3153-3162.
- Such, B. (2011). *PAS 2050 Research Report*. London: British Standards Institution.
- Taha, H. A. (2003). *Operations Research: An introduction*. Prentice Hall, Inc.
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: From design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- The Greenhouse Gas Protocol. (2004). *A Corporate Accounting and Reporting Standard*. WBCSD, c/o Earthprint Limited: USA.
- The Low Carbon Economy Ltd. (2006 - 2012). *The Low Carbon Economy*. Recuperado el 03 de 04 de 2012, de http://www.lowcarboneyconomy.com/profile/the_low_carbon_economy_ltd/_low_carbon_blog/budget_airlines_have_lower_carbon_footprint/8460
- UNFCCC - SBSTA. (1996). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Recuperado el 18 de 09 de 2010, de Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice: http://unfccc.int/essential_background/convention/convention_bodies/items/2629.php
- UNFCCC - SBSTA. (1996). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Recuperado el 18 de 09 de 2010, de Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice: http://unfccc.int/essential_background/convention/convention_bodies/items/2629.php
- Upham, P., Butlin, S., Davis, M., Nilsson, U., & Smith, T. (2005). Allocating aircraft carbon dioxide emission to airports on the basis of passenger share: scenarios for Manchester Airport. En *World Transport Policy and Practice* (págs. 5-12).
- VCÖ. (1997). *Flugverkehr-Wachstum auf Kosten der Umwelt*. Viena: Verkehrsclub Österreich.
- WBCSD & WRI. (2004). *World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute*. Recuperado el 11 de 11 de 2010, de <http://www.ghgprotocol.org/files/ghg-protocol-revised.pdf>
- Whitelegg, J., & Cambridge, H. (2004). *Aviation and sustainability*. Estocolmo: Stockholm Environment Institute.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2007). *A Definition of 'Carbon Footprint'*. United Kingdom: ISA-UK Research & Consulting.

Wild, O., Prather, M., & Akimoto, H. (2001). Indirect long-term global radiative cooling from NO_x emissions. *Geophys*, 1719-1722.

Winther, M. (2006). *Emission Inventory Guidebook*. Dinamarca: The National Environmental Research Institute.

Wood, F. (2007). *Integrating the delivery of greenhouse gas and air pollutant reduction at the local level: a UK case study*. East Anglia: School of Environmental Sciences.

ANEXO A

INICIATIVAS PARA REDUCIR EL PESO EN LAS AERONAVES

País	Aerolínea	Iniciativa	Fuente
Canadá	Air Canada Jazz	La aerolínea ha removido los chalecos salvavidas de todas sus aeronaves para reducir peso y reducir costos de combustible. La regulación permite esto si el vuelo no está más lejos de 50 millas de la costa.	Airline life vests go to cut costs. http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/americas/7586975.stm Accessed 5th November 2008.
Francia	Air France	La aerolínea ha reducido el peso de los carros de servicio a bordo de 29kg a 23kg, los contenedores de 3.6kg a 2.7kg, vasos de vidrio de 1.0kg a 0.5kg, y redujo la cantidad de papel abordo cambiándolo a digital. La reducción total fue de 480kg en cada aeronave.	Corporate Social Responsibility Report 2007-08. http://www.klm.com/travel/csr_en/images/AFKLM%20CSR-report-0708_ENG%20(2)_tcm256-128819.pdf . Accessed 7th November 2008.
Japón	All Nippon Airways (ANA)	Ha introducido una porcelana más ligera para las clases ejecutiva y primera, marcos más ligeros en sus asientos y guardar el alcohol en botellas más pequeñas.	Airlines cut packaging and paperwork to lose weight and reduce fuel. http://www.travelmole.com/stories/1130768.php Accessed 4th November 2008.
Estados Unidos de Norte América	AMR American Airlines	Desde hace 5 años la aerolínea ha mantenido la eficiencia de sus motores al emplear agua a alta presión para limpiar sus motores cada 6 meses.	Environmental Responsibility Report. http://www.aa.com/content/images/amrcorp/amrerr.pdf . Accessed 7th November 2008.
Reino Unido	British Airways	La aerolínea ha colocado sillas de menor peso en la mayoría de sus aeronaves. Con esto se ha logrado por ejemplo que el Boeing 747 sea 200kg más ligero.	Measuring efficiency – flying smarter. http://www.britishairways.com/travel/csr-flyingsmarter/public/en_gb . Accessed 5th November 2008.

Fuente: Adaptado de Mason & Miyoshi, 2009

País	Aerolínea	Iniciativa	Fuente
China	China Southern Airlines	La aerolínea ha solicitado a sus pasajeros que utilicen el baño en tierra. Se estima que una descarga a 30.000 pies de altura, utiliza un litro de combustible.	The Guardian: Skip the toilet, save the planet. http://www.guardian.co.uk/environment/2006/dec/01/ravelsenvironmentalimpact.theairlineindustry . Accessed 5th November 2008.
International Civil Aviation Organization - ICAO		Reducir los artículos operacionales al mínimo (no agua extra, artículos desechables para un solo vuelo, utilización de alfombra más ligera, uso de pintura sin cromo, cabinas sin papel impreso)	Aviation operational measures for fuel and emissions reduction workshop: Weight Management. http://www.icao.int/env/WorkshopFuelEmissions/Presentations/Viscotchi.pdf . Accessed 11th November 2008.
Holanda	KLM	Mediante la aplicación de capas más delgadas de pintura se logró una reducción de peso del 15%.	http://www.klm.com/travel/csr_en/examples/index.htm Accessed 7th November 2008.
Estados Unidos de Norte América	Jet Blue Airways	La aerolínea ha eliminado los audífonos desechables y ha decidido no usar revistas a bordo.	Reducing our footprint. http://www.jetblue.com/green/footprint.asp Accessed 7th November 2008.
Japón	Japan Airlines (JAL)	En 2004 la compañía introdujo porcelana más ligera. La cantidad de agua en el tanque ha sido ajustada; como resultado JAL ha reducido peso de 400kg en sus aviones Boeing 747. En 2007 cambió los carros de aluminio por carros de Twintex (mezcla de vidrio y polipropileno), reduciendo el peso en 26kg. La cantidad de combustible actualmente se mide en unidades de 100 libras en lugar de 1000 libras, para lograr mediciones más precisas.	Global warming: weight reduction. http://www.jal.com/en/environment/conservation/conservation02.html#q_003 . Accessed 5th November 2008.

Fuente: *Ibidem*

País	Aerolínea	Iniciativa	Fuente
Australia	Jetstar Australia	La aerolínea ofrece la opción de viajar con equipaje de mano reduciendo los costos de viaje. De esta forma la aerolínea reduce la cantidad de combustible requerido.	Sustainability Report 2008. http://qantas.republicast3.com/Republicasts/Qantas%20Sustainability%20Report%202008/Qantas%20Sustainability%20Report%202008.pdf . Accessed 7th November 2008.
Reino Unido	Thompson Fly	La aerolínea ha colocado cuero más delgado y una cantidad mayor de sillas ocupadas, para disminuir la emisión relativa por cada pasajero. La tripulación de cabina emplea manuales en formato digital.	Aircraft: sustainable aviation. http://destinations.thomson.co.uk/devolved/sustainable-tourism/tourismtransport.html . Accessed 5th November 2008.
Reino Unido	Virgin Atlantic	La aerolínea ha reemplazado las revistas impresas por mayor cantidad de servicios de entretenimiento abordo. Ha decidido también eliminar la cantidad de periódicos que carga, retirando las botellas vacías o materiales que no se van a utilizar antes de cada vuelo.	Airlines hope to keep a lid on emissions. http://observer.guardian.co.uk/shellenergy/story/0,,1793308,00.html . Accessed 11th November 2008.

Fuente: *Ibidem*

ANEXO B

INICIATIVAS CLAVE A NIVEL MUNDIAL PARA LA MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO

País	Iniciativa	Sitio web	Enfoque
Alemania	Product Carbon Footprint (PCF)	www.pcf-projekt.de	Proyecto piloto gestionado por un consorcio de empresas, sobre la huella de carbono en productos y servicios (10 empresas, 15 etiquetas en la fase 1 de 2008)
Estados Unidos	Clean Energy and Security Act	Comisión de Energía de los Estados Unidos http://energycommerce.house.gov	En la sección 274 de la legislación solicita a la EPA que diseñe un programa de información voluntaria de carbono
Estados Unidos	Iniciativa de sostenibilidad Wal Mart	http://walmartstores.com	Líder en pruebas de huella de carbono de los productos de 40 proveedores
Francia	Bilan Carbone®	www.ademe.fr (en francés)	Soporte del gobierno para probar etiquetas de carbono (cerca de 3,000 productos etiquetados en 2009)
Francia	Proceso del Grenelle de l'environnement	www.ademe.fr (en francés)	Agenda medioambiental del gobierno (apoyo a Bilan Carbone®)
Japón	Guías del Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) para huella de carbono en productos	http://www.meti.go.jp/english	Guía elaborada por el gobierno para el cálculo de la huella de carbono en productos y etiquetado (incluye reglas de categorías por productos, PCR)
Nueva Zelanda	Estrategia de gases de efecto invernadero	www.maf.govt.nz	Estrategia nacional para el cálculo y la reducción de la huella de carbono
Nueva Zelanda	Pastoral GHG Research Consortium	www.pggrc.co.nz	Consortio nacional académico y comercial que da soporte a la medición y reducción de la huella de carbono (mitigación para actividades de pastoreo)
Reino Unido	PAS 2050	www.carbontrust.co.uk	Guías elaboradas con el apoyo del gobierno para la huella de carbono en productos (utilizada en Reino Unido y otros lugares)
Reino Unido	Tesco	www.tesco.com	Líder en las pruebas de etiquetado en los supermercados, basadas en la metodología propuesta por el PAS 2050 (~100 productos)

Fuente: Comisión Económica Para Latinoamérica y el Caribe – CEPAL

ANEXO C

MÉTODOS DE UBICACIÓN DE EMISIONES, PROPUESTOS PARA LA AVIACIÓN INTERNACIONAL POR PARTE DE LAS NACIONES UNIDAS Y SU UNIDAD SBSTA

Método de ubicación de las emisiones de aviación internacionales	
Opción 1	No ubicar las emisiones – continuar sin cambios
Opción 2	Ubicación de centros globales de venta de combustible y emisiones asociadas, de acuerdo a la cantidad de emisiones nacionales
Opción 3	Ubicación de partes de acuerdo al país donde el combustible es vendido
Opción 4	Ubicación de las partes de acuerdo a la nacionalidad de la compañía transportadora, o al país en el cual la aeronave está registrada, o el país del explotador de la aeronave.
Opción 5	Ubicación de las partes de acuerdo al lugar de origen o de destino de la aeronave, o alternativamente las emisiones pueden ser compartidas entre el país de origen y el país de destino.
Opción 6	Ubicación de las partes de acuerdo al país de destino o de origen del pasajero la carga. Alternativamente las emisiones relacionadas al viaje del pasajero o la carga, podrían ser compartidas por el país de origen del vuelo y el país de destino.
Opción 7	Ubicación de las partes de acuerdo al país de origen del pasajero o el propietario de la carga.
Opción 8	Ubicación de la parte de todas las emisiones generadas en su espacio aéreo nacional.

Fuente: Adaptado de UNFCCC - SBSTA, 1996

ANEXO D

INVENTARIOS SUB-NACIONALES Y SUS TRATAMIENTOS PARA LAS EMISIONES DE AVIACIÓN

Inventario	Autor	Tratamiento de las emisiones aeronáuticas
Greenhouse Gas regional Inventory Project	(Carney, 2006)	Todos los LTO y cruise. Las Emisiones están ubicadas basándose en las emisiones nacionales totales y el número de despegues del aeropuerto de NW comparado con los de Reino Unido
London Energy and CO ₂ Emissions Inventory 2003	(Greater London Authority, 2003)	LTO solamente de los aeropuertos de Londres y de Heathrow
North west Emissions Inventory	(Peace & McCubbin, 2005)	Incluye emisiones de carreteo y aterrizaje de los vuelos que arriban a los aeropuertos del Noroeste
Norfolk Air Pollutant and Greenhouse Gas Inventory	(Wood, 2007)	Solamente LTO para vuelos nacionales e internacionales
Manchester Airport	(Upham, Butlin, Davis, Nilsson, & Smith, 2005)	LTO y cruise

Fuente: Bows, Anderson, & Wood, 2010.

ANEXO E
FACTORES DE CONVERSIÓN DE GASES LISTADOS EN EL PROTOCOLO DE KYOTO/MONTREAL

(1) GWP: Potencial de calentamiento global a 100 años.

Valores de GWP correspondientes al AR4: IPCC Fourth Assessment Report (IPCC, 2007)

Emisión	Fórmula Química	GWP (1)	Protocolo
Carbon Dioxide	CO ₂	1	Alcance 1 (Kyoto)
Methane	CH ₄	25	Alcance 1 (Kyoto)
Nitrous Oxide	N ₂ O	298	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-23	CHF ₃	14,800	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-32	CH ₂ F ₂	675	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-41	CH ₃ F	150	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	3,500	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	1,000	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	1,430	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-143	CH ₃ CF ₃	300	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-143a	CH ₃ CHF ₂	4,470	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-152a	CF ₃ CHF ₂ CF ₃	124	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-227ea	CF ₃ CH ₂ CF ₃	3,220	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-236fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	9,810	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-245fa	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃	1,030	Alcance 1 (Kyoto)
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCH ₂ CF ₂ CF ₃	1,640	Alcance 1 (Kyoto)
Perfluoromethane (PFC-14)	CF ₄	7,390	Alcance 1 (Kyoto)
Perfluoroethane (PFC-116)	C ₂ F ₆	12,200	Alcance 1 (Kyoto)
Perfluoropropane (PFC-218)	C ₃ F ₈	8,830	Alcance 1 (Kyoto)
Perfluorocyclobutane (PFC-	C-C ₄ F ₈		Alcance 1

318)		10,300	(Kyoto)
Perfluorobutane (PFC-3-1-10)	C ₄ F ₁₀	8,860	Alcance 1 (Kyoto)
Perfluoropentane (PFC-4-1-12)	C ₅ F ₁₂	9,160	Alcance 1 (Kyoto)
Perfluorohexane (PFC-5-1-14)	C ₆ F ₁₄	9,300	Alcance 1 (Kyoto)
Sulphur hexafluoride	SF ₆	22,800	Alcance 1 (Kyoto)
R404A	52:44:4 blend of HFC-143a, -125 and -134a	3,922	Alcance 1 (Kyoto)
R407C	23:25:52 blend of HFC-32, -125 and -134a	1,774	Alcance 1 (Kyoto)
R408A	47:7:46 blend HCFC-22, HFC-125 and HFC-143a	3,152	Alcance 1 (Kyoto)
R410A	50:50 blend of HFC-32 and -125	2,088	Alcance 1 (Kyoto)
R507	50:50 blend of HFC-125 and HFC-143a	3,985	Alcance 1 (Kyoto)
R508B	46:54 blend of HFC-23 and PFC-116	13,396	Alcance 1 (Kyoto)
CFC-11/R11 = Trichlorofluoromethane	CCl ₃ F	4,750	Otros (Montreal)
CFC-12/R12 = Dichlorodifluoromethane	CCl ₂ F ₂	10,900	Otros (Montreal)
CFC-13	CCIF ₃	14,400	Otros (Montreal)
CFC-113	CCl ₂ FCCIF ₂	6,130	Otros (Montreal)
CFC-114	CCIF ₂ CCIF ₂	10,000	Otros (Montreal)
CFC-115	CCIF ₂ CF ₃	7,370	Otros (Montreal)
Halon-1211	CBrClF ₂	1,890	Otros (Montreal)
Halon-1301	CBrF ₃	7,140	Otros (Montreal)
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	1,640	Otros (Montreal)
Carbon tetrachloride	CCl ₄	1,400	Otros (Montreal)
Methyl bromide	CH ₃ Br	5	Otros (Montreal)
Methyl chloroform	CH ₃ CCl ₃	146	Otros (Montreal)
R22/HCFC-22	CHClF ₂	1,810	Otros (Montreal)

HCFC-123	CHCl_2CF_3	77	Otros (Montreal)
HCFC-124	CHClCF_3	609	Otros (Montreal)
HCFC-141b	$\text{CH}_3\text{CCl}_2\text{F}$	725	Otros (Montreal)
HCFC-142b	CH_3CClF_2	2,310	Otros (Montreal)
HCFC-225ca	$\text{CHCl}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	122	Otros (Montreal)
HCFC-225cb	$\text{CHClCF}_2\text{CClF}_2$	595	Otros (Montreal)
Nitrogen trifluoride	NF_3	17,200	Otros
PFC-4-1-12	C_5F_{12}	9,160	Otros
PFC-9-1-18	$\text{C}_{10}\text{F}_{18}$	7,500	Otros
trifluoromethyl sulphur pentafluoride	SF_5CF_3	17,700	Otros
HFE-125	CHF_2OCF_3	14,900	Otros
HFE-134	$\text{CHF}_2\text{OCHF}_2$	6,320	Otros
HFE-143a	CH_3OCF_3	756	Otros
HCFE-235da2	$\text{CHF}_2\text{OCHClCF}_3$	350	Otros
HFE-245cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	708	Otros
HFE-245fa2	$\text{CHF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	659	Otros
HFE-254cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	359	Otros
HFE-347mcc3	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	575	Otros
HFE-347pcf2	$\text{CHF}_2\text{CF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	580	Otros
HFE-356pcc3	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CHF}_2$	110	Otros
HFE-449sl (HFE-7100)	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OCH}_3$	297	Otros
HFE-569sf2 (HFE-7200)	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$	59	Otros
HFE-43-10pccc124 (H-Galden1040x)	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OC}_2\text{F}_4\text{OCHF}_2$	1,870	Otros
HFE-236ca12 (HG-10)	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OCHF}_2$		Otros

		2,800	
HFE-338pcc13 (HG-01)	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{OCHF}_2$	1,500	Otros
PFPME	$\text{CF}_3\text{OCF}(\text{CF}_3)\text{CF}_2\text{OCF}_2\text{OCF}_3$	10,300	Otros
Dimethylether	CH_3OCH_3	1	Otros
Methylene chloride	CH_2Cl_2	9	Otros
Methyl chloride	CH_3Cl	13	Otros
R290 = Propane	C_3H_8	3	Otros
R600A = Isobutane	C_4H_{10}	0	Otros
R406A	55:41:4 blend of HCFC-22, HCFC-142b and R600A	1,943	Otros
R409A	60:25:15 blend of HCFC-22, HCFC-124 and HCFC-142b	1,585	Otros
R502	48.8:51.2 blend of HCFC-22 and CFC-115	4,657	Otros
Amoníaco		1	Otros

¹ Over the period of one century. The length of time a GWP is referenced to, is important. 100 year GWPs were adopted for use under the UNFCCC and Kyoto Protocol.

² Produced by AEA for the Department of Energy and Climate Change (DECC) and the Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra)

ANEXO F
EMISIONES CALCULADAS EN LA ETAPA AERONAVE

Output

Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials		
Elementary		
air		
high population density		
Heat, waste [air/high population density]	15,888,665.36	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/high population density]	981,364.84	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/high population density]	56,436.46	kg
Nitrogen oxides [air/high population density]	907.50	kg
Sulfur dioxide [air/high population density]	814.78	kg
Carbon monoxide, fossil [air/high population density]	371.01	kg
Methane, fossil [air/high population density]	336.47	kg
Particulates, > 10 um [air/high population density]	142.98	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um [air/high population density]	114.23	kg
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/high population density]	107.33	kg
Radioactive species, other beta emitters [air/high population density]	84.34	kBq
Particulates, < 2.5 um [air/high population density]	72.18	kg
Pentane [air/high population density]	20.55	kg
Polonium-210 [air/high population density]	16.55	kBq
Butane [air/high population density]	14.32	kg
Dinitrogen monoxide [air/high population density]	12.68	kg
Radium-228 [air/high population density]	12.65	kBq
Water [air/high population density]	12.31	kg
Propane [air/high population density]	9.70	kg
Hydrogen chloride [air/high population density]	9.59	kg
Lead-210 [air/high population density]	9.05	kBq
Carbon monoxide, biogenic [air/high population density]	8.85	kg
Sulfate [air/high population density]	7.23	kg
Ethane [air/high population density]	5.71	kg
Hexane [air/high population density]	5.29	kg
Potassium [air/high population density]	4.78	kg
Benzene [air/high population density]	4.37	kg
Silicon [air/high population density]	4.35	kg
Hydrogen [air/high population density]	4.11	kg
Potassium-40 [air/high population density]	2.63	kBq
Aluminium [air/high population density]	2.58	kg
Acetic acid [air/high population density]	2.58	kg
Toluene [air/high population density]	2.57	kg
Formaldehyde [air/high population density]	2.53	kg
Ammonia [air/high population density]	2.53	kg
Radium-226 [air/high population density]	2.34	kBq
Methane, biogenic [air/high population density]	2.21	kg
Uranium-238 [air/high population density]	1.95	kBq
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified [air/high population density]	1.87	kg

Hydrocarbons, aromatic [air/high population density]	1.79	kg
Calcium [air/high population density]	1.60	kg
Sodium [air/high population density]	1.47	kg
Heptane [air/high population density]	1.39	kg
Vanadium [air/high population density]	1.35	kg
Fluosilicic acid [air/high population density]	1.23	kg
Ethene [air/high population density]	1.14	kg
Thorium-228 [air/high population density]	1.07	kBq
low population density		
Noble gases, radioactive, unspecified [air/low population density]	246,240,019.59	kBq
Radon-222 [air/low population density]	10,990,003.41	kBq
Heat, waste [air/low population density]	9,628,552.99	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/low population density]	725,615.02	kg
Hydrogen-3, Tritium [air/low population density]	146,844.87	kBq
Xenon-133 [air/low population density]	37,229.30	kBq
Carbon-14 [air/low population density]	25,898.84	kBq
Xenon-135 [air/low population density]	15,130.74	kBq
Xenon-135m [air/low population density]	9,139.67	kBq
Krypton-85 [air/low population density]	8,606.54	kBq
Carbon dioxide, biogenic [air/low population density]	5,082.57	kg
Methane, fossil [air/low population density]	3,492.67	kg
Sulfur dioxide [air/low population density]	3,388.34	kg
Argon-41 [air/low population density]	2,744.21	kBq
Xenon-138 [air/low population density]	1,776.35	kBq
Nitrogen oxides [air/low population density]	1,527.75	kg
Radon-220 [air/low population density]	1,526.10	kBq
Particulates, > 10 um [air/low population density]	1,215.80	kg
Xenon-131m [air/low population density]	1,115.27	kBq
Iodine-131 [air/low population density]	1,081.77	kBq
Krypton-85m [air/low population density]	717.84	kBq
Particulates, > 2.5 um, and < 10um [air/low population density]	475.92	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/low population density]	347.13	kg
Particulates, < 2.5 um [air/low population density]	342.34	kg
Carbon monoxide, fossil [air/low population density]	311.79	kg
Polonium-210 [air/low population density]	258.18	kBq
Krypton-88 [air/low population density]	251.97	kBq
Krypton-87 [air/low population density]	232.99	kBq
Xenon-137 [air/low population density]	217.65	kBq
Uranium alpha [air/low population density]	193.86	kBq
Radium-226 [air/low population density]	151.90	kBq
Lead-210 [air/low population density]	146.13	kBq
Xenon-133m [air/low population density]	115.59	kBq
Krypton-89 [air/low population density]	79.45	kBq
Uranium-238 [air/low population density]	67.58	kBq
Carbon dioxide, land transformation [air/low population density]	67.22	kg
Hydrogen chloride [air/low population density]	59.13	kg
Ethane [air/low population density]	55.70	kg
Uranium-234 [air/low population density]	41.56	kBq
Potassium-40 [air/low population density]	33.46	kBq

Carbon monoxide, biogenic [air/low population density]	30.67	kg
Iodine-129 [air/low population density]	25.62	kBq
Methane, biogenic [air/low population density]	18.29	kg
Propane [air/low population density]	16.17	kg
Hydrogen fluoride [air/low population density]	14.08	kg
Dinitrogen monoxide [air/low population density]	13.62	kg
Thorium-230 [air/low population density]	13.26	kBq
Radium-228 [air/low population density]	12.43	kBq
Thorium-232 [air/low population density]	10.51	kBq
Boron [air/low population density]	8.92	kg
Hydrogen sulfide [air/low population density]	8.66	kg
Chromium [air/low population density]	7.43	kg
Thorium-228 [air/low population density]	6.69	kBq
Aerosols, radioactive, unspecified [air/low population density]	6.26	kBq
Xylene [air/low population density]	6.17	kg
Ammonia [air/low population density]	5.24	kg
Silicon [air/low population density]	5.13	kg
Carbon disulfide [air/low population density]	4.62	kg
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified [air/low population density]	4.55	kg
Benzene [air/low population density]	3.70	kg
Thorium-234 [air/low population density]	3.57	kBq
Protactinium-234 [air/low population density]	3.57	kBq
Butane [air/low population density]	2.84	kg
Zinc [air/low population density]	2.07	kg
Uranium-235 [air/low population density]	2.01	kBq
Hydrocarbons, aromatic [air/low population density]	1.62	kg
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated [air/low population density]	1.45	kg
Ethene [air/low population density]	1.26	kg
Bromine [air/low population density]	1.01	kg
low population density, long-term		
Radon-222 [air/low population density, long-term]	460,473,207.51	kBq
Particulates, > 10 um [air/low population density, long-term]	24.01	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um [air/low population density, long-term]	14.41	kg
Iron [air/low population density, long-term]	13.09	kg
Aluminium [air/low population density, long-term]	12.04	kg
Sulfate [air/low population density, long-term]	11.08	kg
Particulates, < 2.5 um [air/low population density, long-term]	9.60	kg
Calcium [air/low population density, long-term]	3.91	kg
Silicon [air/low population density, long-term]	2.68	kg
Potassium [air/low population density, long-term]	2.06	kg
Magnesium [air/low population density, long-term]	1.20	kg
lower stratosphere + upper troposphere		
Heat, waste [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.21	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.01	kg
Water [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.01	kg
Nitrogen oxides [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Carbon monoxide, fossil [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Sulfur dioxide [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg

NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Ethylene oxide [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Formaldehyde [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Methane, fossil [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Particulates, < 2.5 um [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Dinitrogen monoxide [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Benzene [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Butadiene [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Copper [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Zinc [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Hydrogen chloride [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Nickel [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Chromium [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Lead [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Cadmium [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Selenium [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
Mercury [air/lower stratosphere + upper troposphere]	0.00	kg
unspecified		
Heat, waste [air/unspecified]	9,766,666.49	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	314,885.46	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/unspecified]	6,407.60	kg
Carbon monoxide, fossil [air/unspecified]	5,084.48	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/unspecified]	4,228.87	kg
Nitrogen oxides [air/unspecified]	912.39	kg
Sulfur dioxide [air/unspecified]	485.35	kg
Particulates, < 2.5 um [air/unspecified]	153.33	kg
Water [air/unspecified]	86.01	kg
Aluminium [air/unspecified]	55.97	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um [air/unspecified]	36.95	kg
Ammonia [air/unspecified]	29.55	kg
Methane, biogenic [air/unspecified]	27.81	kg
Hydrogen fluoride [air/unspecified]	22.43	kg
Particulates, > 10 um [air/unspecified]	13.37	kg
Dinitrogen monoxide [air/unspecified]	12.97	kg
Ozone [air/unspecified]	10.31	kg
Methane, tetrafluoro-, R-14 [air/unspecified]	9.46	kg
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified [air/unspecified]	6.04	kg
Hydrogen chloride [air/unspecified]	4.83	kg
Methane, fossil [air/unspecified]	4.79	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons [air/unspecified]	3.36	kg
Hydrocarbons, aromatic [air/unspecified]	2.03	kg
Hydrogen sulfide [air/unspecified]	1.14	kg
Ethane, hexafluoro-, HFC-116 [air/unspecified]	1.05	kg
Acetic acid [air/unspecified]	0.79	kg
Formaldehyde [air/unspecified]	0.78	kg
Zinc [air/unspecified]	0.68	kg
Acetaldehyde [air/unspecified]	0.40	kg
Methanol [air/unspecified]	0.40	kg
Iron [air/unspecified]	0.37	kg

Hydrocarbons, chlorinated [air/unspecified]	0.34 kg
Lead [air/unspecified]	0.22 kg
Toluene [air/unspecified]	0.18 kg
Benzene [air/unspecified]	0.16 kg
Sulfur hexafluoride [air/unspecified]	0.12 kg
Benzo(a)pyrene [air/unspecified]	0.10 kg
Xylene [air/unspecified]	0.10 kg
Mercury [air/unspecified]	0.07 kg
Chromium [air/unspecified]	0.07 kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a [air/unspecified]	0.06 kg
Copper [air/unspecified]	0.06 kg
Manganese [air/unspecified]	0.05 kg
Hydrogen [air/unspecified]	0.05 kg
Nickel [air/unspecified]	0.04 kg
Cadmium [air/unspecified]	0.00 kg
Phosphorus [air/unspecified]	0.00 kg
Chlorine [air/unspecified]	0.00 kg
Vanadium [air/unspecified]	0.00 kg
Tin [air/unspecified]	0.00 kg
Thallium [air/unspecified]	0.00 kg
Arsenic [air/unspecified]	0.00 kg
Ethane [air/unspecified]	0.00 kg
Pentane [air/unspecified]	0.00 kg
Butane [air/unspecified]	0.00 kg
Hexane [air/unspecified]	0.00 kg
Propane [air/unspecified]	0.00 kg
Polychlorinated biphenyls [air/unspecified]	0.00 kg
Cobalt [air/unspecified]	0.00 kg
Ethyne [air/unspecified]	0.00 kg
Titanium [air/unspecified]	0.00 kg
Beryllium [air/unspecified]	0.00 kg
Selenium [air/unspecified]	0.00 kg
Benzene, hexachloro- [air/unspecified]	0.00 kg
Antimony [air/unspecified]	0.00 kg
Phenol [air/unspecified]	0.00 kg
Sulfate [air/unspecified]	0.00 kg
Chromium VI [air/unspecified]	0.00 kg
Propionic acid [air/unspecified]	0.00 kg
Fluorine [air/unspecified]	0.00 kg
Sodium [air/unspecified]	0.00 kg
Aldehydes, unspecified [air/unspecified]	0.00 kg
Magnesium [air/unspecified]	0.00 kg
Ethylene oxide [air/unspecified]	0.00 kg
Propene [air/unspecified]	0.00 kg
Molybdenum [air/unspecified]	0.00 kg
Radon-220 [air/unspecified]	0.00 kBq
Acrolein [air/unspecified]	0.00 kg
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin [air/unspecified]	0.00 kg
Radon-222 [air/unspecified]	0.00 kBq
Polonium-210 [air/unspecified]	0.00 kBq

Butadiene [air/unspecified]	0.00	kg
Lead-210 [air/unspecified]	0.00	kBq
Radium-226 [air/unspecified]	0.00	kBq
Potassium-40 [air/unspecified]	0.00	kBq
Uranium-238 [air/unspecified]	0.00	kBq
Radium-228 [air/unspecified]	0.00	kBq
Thorium-232 [air/unspecified]	0.00	kBq
Ethene, tetrachloro- [air/unspecified]	0.00	kg
Silicon [air/unspecified]	0.00	kg
Thorium-228 [air/unspecified]	0.00	kBq
Methane, tetrachloro-, R-10 [air/unspecified]	0.00	kg
Helium [air/unspecified]	0.00	kg
Acenaphthene [air/unspecified]	0.00	kg
Boron [air/unspecified]	0.00	kg
Bromine [air/unspecified]	0.00	kg
Iodine [air/unspecified]	0.00	kg
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated [air/unspecified]	0.00	kg
Cyanide [air/unspecified]	0.00	kg
Barium [air/unspecified]	0.00	kg
Strontium [air/unspecified]	0.00	kg
Benzal chloride [air/unspecified]	0.00	kg
Propanal [air/unspecified]	0.00	kg
Methane, bromo-, Halon 1001 [air/unspecified]	0.00	kg
Carbon disulfide [air/unspecified]	0.00	kg
Isoprene [air/unspecified]	0.00	kg
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140 [air/unspecified]	0.00	kg
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12 [air/unspecified]	0.00	kg
Chloroform [air/unspecified]	0.00	kg
Ethene, chloro- [air/unspecified]	0.00	kg
Styrene [air/unspecified]	0.00	kg
Furan [air/unspecified]	0.00	kg
Cumene [air/unspecified]	0.00	kg

MJ	36,965,922.15	MJ
kBq	729,063,729.18	kBq
kg	2,370,720.01	kg
unit	1.00	unit

ANEXO G
LISTADO DE PAÍSES PROVEEDORES PARA BOEING Y PARA AIRBUS

AIRBUS Suppliers		BOEING Suppliers	
Country	Region	Country	Region
USA	America	CANADA	America
GERMANY	WENA	USA	America
SPAIN	WENA	MEXICO	America
FRANCE	WENA	JAMAICA	America
MEXICO	America	HONDURAS	America
NEW ZEALAND	Asia & Pacific	PANAMA	America
POLAND	WENA	ARUBA	America
GREAT BRITAIN	WENA	ANTILLIES	America
ITALY	WENA	TRINIDAD AND TOBAGO	America
FINLAND	WENA	COLOMBIA	America
BELGIUM	WENA	PERU	America
SWITZERLAND	WENA	CHILE	America
CANADA	America	PARAGUAY	America
TUNISIA	MENA	BRAZIL	America
MOROCCO	MENA	BARBADOS	America
INDIA	Asia & Pacific	GREENLAND	WENA
ROMANIA	CEE	CAPE VERDE ISLAND	WENA
SOUTH AFRICA	Africa	ISLE OF MAN	WENA
TAIWAN	Asia & Pacific	IRELAND	WENA
CHINA	Asia & Pacific	UNITED KINGDOM	WENA
NETHERLANDS	WENA	MOROCCO	Africa
LUXEMBOURG	WENA	PORTUGAL	WENA
AUSTRALIA	Asia & Pacific	SOUTH AFRICA	Africa
HUNGARY	CEE	ANGOLA	Africa
MALAYSIA	Asia & Pacific	NIGER	Africa
JAPAN	Asia & Pacific	KENYA	Africa
AUSTRIA	WENA	ETHIOPIA	Africa
DENMARK	WENA	GREECE	WENA
IRELAND	WENA	SPAIN	WENA
SOUTH KOREA	Asia & Pacific	FRANCE	WENA
CZECH REPUBLIC	CEE	BELGIUM	WENA
THAILAND	Asia & Pacific	LUXEMBOURG	WENA
UNITED ARAB EMIRATES	MENA	SWITZERLAND	WENA
SINGAPORE	Asia & Pacific	GERMANY	WENA
INDONESIA	Asia & Pacific	CZECH REPUBLIC	CEE
RUSSIAN FEDERATION	CEE	AUSTRIA	WENA
JORDAN	MENA	HUNGARY	CEE

TURKEY	CEE	ITALY	WENA
PORTUGAL	WENA	SLOVENIA	CEE
SWEDEN	WENA	DENMARK	WENA
PHILIPPINES	Asia & Pacific	SWEDEN	WENA
NORWAY	WENA	FINLAND	WENA
LIECHTENSTEIN	WENA	NORWAY	WENA
PAKISTAN	Asia & Pacific	LITHUANIA	CEE
		POLAND	WENA
		UKRAINE	CEE
		ROMANIA	CEE
		TURKEY	CEE
		RUSSIAN FEDERATION	CEE
		CYPRUS	CEE
		LEBANON	MENA
		IRAQ	MENA
		KUWAIT	MENA
		JORDAN	MENA
		ISRAEL	MENA
		BAHRAIN	MENA
		SAUDI ARABIA	MENA
		QATAR	MENA
		UNITED ARAB EMIRATES	MENA
		KAZAKHSTAN	CEE
		UZBEKISTAN	CEE
		TURKMENISTAN	CEE
		AFGHANISTAN	Asia & Pacific
		PAKISTAN	Asia & Pacific
		INDIA	Asia & Pacific
		CHINA	Asia & Pacific
		SOUTH KOREA	Asia & Pacific
		JAPAN	Asia & Pacific
		TAIWAN	Asia & Pacific
		HONG KONG	Asia & Pacific
		VIETNAM	Asia & Pacific
		THAILAND	Asia & Pacific
		PHILIPPINES	Asia & Pacific
		MALAYSIA	Asia & Pacific
		SINGAPORE	Asia & Pacific
		AUSTRALIA	Asia & Pacific
		NEW ZEALAND	Asia & Pacific

ANEXO H
EMISIONES CALCULADAS PARA LA ETAPA PRE-VUELO

Output A320		
Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials		
air		
high population density		
Heat, waste [air/high population density]	1,703.72	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/high population density]	118.29	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/high population density]	2.00	kg
low population density		
Noble gases, radioactive, unspecified [air/low population density]	11,014.37	kBq
Heat, waste [air/low population density]	1,596.00	MJ
Radon-222 [air/low population density]	505.04	kBq
Carbon dioxide, fossil [air/low population density]	102.81	kg
Hydrogen-3, Tritium [air/low population density]	6.52	kBq
Carbon dioxide, land transformation [air/low population density]	4.55	kg
Xenon-133 [air/low population density]	1.86	kBq
Sulfur dioxide [air/low population density]	1.62	kg
Carbon-14 [air/low population density]	1.16	kBq
low population density, long-term		
Radon-222 [air/low population density, long-term]	20,576.51	kBq
lower stratosphere + upper troposphere		
unspecified		
Heat, waste [air/unspecified]	376.83	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	11.63	kg

Output B727		
Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials		
air		
high population density		
Heat, waste [air/high population density]	4,035.21	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/high population density]	279.63	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/high population density]	3.55	kg
Sulfur dioxide [air/high population density]	1.28	kg
low population density		
Noble gases, radioactive, unspecified [air/low population density]	26,008.39	kBq
Heat, waste [air/low population density]	3,806.74	MJ
Radon-222 [air/low population density]	1,177.19	kBq
Carbon dioxide, fossil [air/low population density]	245.20	kg
Hydrogen-3, Tritium [air/low population density]	15.44	kBq
Carbon dioxide, land transformation [air/low population density]	4.57	kg
Sulfur dioxide [air/low population density]	3.89	kg
Xenon-133 [air/low population density]	3.57	kBq
Carbon-14 [air/low population density]	2.71	kBq
Methane, fossil [air/low population density]	2.17	kg
Nitrogen oxides [air/low population density]	1.56	kg
Xenon-135 [air/low population density]	1.46	kBq
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/low population density]	1.37	kg
Krypton-85 [air/low population density]	1.08	kBq
low population density, long-term		

Radon-222 [air/low population density, long-term]

47,918.71 kBq

ANEXO I
EMISIONES CALCULADAS EN LA ETAPA VUELO

Output B727

Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials		
Elementary		
air		
high population density		
Heat, waste [air/high population density]	32,018.52	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/high population density]	2,215.15	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/high population density]	22.18	kg
Sulfur dioxide [air/high population density]	10.19	kg
Nitrogen oxides [air/high population density]	2.92	kg
low population density		
Noble gases, radioactive, unspecified [air/low population density]	206,131.71	kBq
Heat, waste [air/low population density]	30,336.77	MJ
Radon-222 [air/low population density]	9,251.12	kBq
Carbon dioxide, fossil [air/low population density]	1,954.20	kg
Hydrogen-3, Tritium [air/low population density]	122.58	kBq
Sulfur dioxide [air/low population density]	31.08	kg
Xenon-133 [air/low population density]	24.06	kBq
Carbon-14 [air/low population density]	21.23	kBq
Methane, fossil [air/low population density]	17.26	kg
Nitrogen oxides [air/low population density]	12.46	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/low population density]	10.92	kg
Xenon-135 [air/low population density]	9.87	kBq
Krypton-85 [air/low population density]	8.57	kBq
Xenon-135m [air/low population density]	5.82	kBq
Carbon dioxide, land transformation [air/low population density]	4.70	kg
Carbon monoxide, fossil [air/low population density]	3.79	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/low population density]	3.62	kg
Argon-41 [air/low population density]	2.74	kBq
Radon-220 [air/low population density]	1.16	kBq
Particulates, > 10 um [air/low population density]	1.11	kg
Iodine-131 [air/low population density]	1.08	kBq
Particulates, < 2.5 um [air/low population density]	1.04	kg
low population density, long-term		
Radon-222 [air/low population density, long-term]	376,379.32	kBq
lower stratosphere + upper troposphere		
Heat, waste [air/lower stratosphere + upper troposphere]	64.74	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/lower stratosphere + upper troposphere]	4.47	kg
Water [air/lower stratosphere + upper troposphere]	1.76	kg
unspecified		
Heat, waste [air/unspecified]	7,077.46	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	229.25	kg
Water [air/unspecified]	4.16	kg
Carbon monoxide, fossil [air/unspecified]	2.69	kg

Carbon dioxide, biogenic [air/unspecified]	1.79	kg
Nitrogen oxides [air/unspecified]	1.67	kg

Output A320

Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials		
Elementary		
air		
high population density		
Heat, waste [air/high population density]	13,373.31	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/high population density]	924.89	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/high population density]	9.80	kg
Sulfur dioxide [air/high population density]	4.24	kg
Nitrogen oxides [air/high population density]	1.22	kg
low population density		
Noble gases, radioactive, unspecified [air/low population density]	86,222.29	kBq
Heat, waste [air/low population density]	12,657.16	MJ
Radon-222 [air/low population density]	3,875.88	kBq
Carbon dioxide, fossil [air/low population density]	815.46	kg
Hydrogen-3, Tritium [air/low population density]	51.26	kBq
Sulfur dioxide [air/low population density]	12.94	kg
Xenon-133 [air/low population density]	10.42	kBq
Carbon-14 [air/low population density]	8.90	kBq
Methane, fossil [air/low population density]	7.19	kg
Nitrogen oxides [air/low population density]	5.19	kg
Carbon dioxide, land transformation [air/low population density]	4.61	kg
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/low population density]	4.55	kg
Xenon-135 [air/low population density]	4.27	kBq
Krypton-85 [air/low population density]	3.58	kBq
Xenon-135m [air/low population density]	2.52	kBq
Carbon monoxide, fossil [air/low population density]	1.58	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/low population density]	1.51	kg
Argon-41 [air/low population density]	1.14	kBq
low population density, long-term		
Radon-222 [air/low population density, long-term]	157,719.63	kBq
lower stratosphere + upper troposphere		
Heat, waste [air/lower stratosphere + upper troposphere]	64.74	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/lower stratosphere + upper troposphere]	4.47	kg
Water [air/lower stratosphere + upper troposphere]	1.76	kg
unspecified		
Heat, waste [air/unspecified]	3,045.38	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	101.74	kg
Water [air/unspecified]	4.13	kg
Carbon monoxide, fossil [air/unspecified]	1.13	kg

ANEXO J
EMISIONES CALCULADAS EN LA ETAPA POS-VUELO

Output B727		
Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials		
Elementary		
air		
high population density		
Heat, waste [air/high population density]	4,035.21	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/high population density]	279.63	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/high population density]	3.55	kg
Sulfur dioxide [air/high population density]	1.28	kg
low population density		
Noble gases, radioactive, unspecified [air/low population density]	26,008.39	kBq
Heat, waste [air/low population density]	3,806.74	MJ
Radon-222 [air/low population density]	1,177.19	kBq
Carbon dioxide, fossil [air/low population density]	245.20	kg
Hydrogen-3, Tritium [air/low population density]	15.44	kBq
Carbon dioxide, land transformation [air/low population density]	4.57	kg
Sulfur dioxide [air/low population density]	3.89	kg
Xenon-133 [air/low population density]	3.57	kBq
Carbon-14 [air/low population density]	2.71	kBq
Methane, fossil [air/low population density]	2.17	kg
Nitrogen oxides [air/low population density]	1.56	kg
Xenon-135 [air/low population density]	1.46	kBq
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin [air/low population density]	1.37	kg
Krypton-85 [air/low population density]	1.08	kBq
low population density, long-term		
Radon-222 [air/low population density, long-term]	47,918.71	kBq
lower stratosphere + upper troposphere		
unspecified		
Heat, waste [air/unspecified]	881.02	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	27.58	kg

Output A320		
Item	Quantity	Unit
EcoSpold Materials		
Elementary		
air		
high population density		
Heat, waste [air/high population density]	1,703.72	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/high population density]	118.29	kg
Carbon dioxide, biogenic [air/high population density]	2.00	kg
low population density		
Noble gases, radioactive, unspecified [air/low population density]	11,014.37	kBq
Heat, waste [air/low population density]	1,596.00	MJ
Radon-222 [air/low population density]	505.04	kBq
Carbon dioxide, fossil [air/low population density]	102.81	kg

Hydrogen-3, Tritium [air/low population density]	6.52	kBq
Carbon dioxide, land transformation [air/low population density]	4.55	kg
Xenon-133 [air/low population density]	1.86	kBq
Sulfur dioxide [air/low population density]	1.62	kg
Carbon-14 [air/low population density]	1.16	kBq

low population density, long-term

Radon-222 [air/low population density, long-term]	20,576.51	kBq
---	-----------	-----

lower stratosphere + upper troposphere

unspecified

Heat, waste [air/unspecified]	376.83	MJ
Carbon dioxide, fossil [air/unspecified]	11.63	kg

ANEXO K
EMISIONES CALCULADAS EN LA ETAPA POS-VUELO

PROCEDIMIENTO A SEGUIR			
Matrícula Aeronave	S/N: Serie Aeronave	Brand: Marca Aeronave	MODEL: Modelo Aeronave
Datos técnicos:			
<ul style="list-style-type: none"> TSO C40a DO-153 y C36c, Class D, Cat II DO-131 TC 3 A 12, Rev. 74 de Octubre 2, 2007. FAA, Advisory Circulars AC43.13-1b CHG 1 09/27/2001 y AC 43.13-2A 01/01/1977 Cessna, Maintenance Manual 172 P/N: D 2065-3-13AF Rev 5 01/07/00 UAEAC, Circulares Informativas CI No. 101-E/T-29 y CI No. 101-E/T-30 Rev. 26 /11/06/06 Marca aeronave, Manual de mantenimiento de la aeronave, P/N Manual, Rev. Manual. 			

A. MATERIALES REQUERIDOS

MATERIALES	P/N <small>(Los parte números mostrados se presentan a manera de ejemplo)</small>	Cantidad
MANUAL AERONAVE	066-10627-0100	1
LISTA DE EQUIPOS MÍNIMOS (MEL)	050-01712-0000	1
LIBRO DE VUELO AERONAVE	452-6504	1
MANUAL INSPECCIÓN RUTINA	455-7423	1
MAPA DE RUTAS AERONAUTICAS COLOMBIANAS	611-6013-04	1
ORDEN DE CARGA DE LA AERONAVE	27500-22TE3TT14	1
HOJA DE PESO Y BALANCE DE LA AERONAVE	030-1107-3012	1
MAPA METEOROLÓGICO DE LA RUTA AERONÁUTICA	030-0101-0212	1
INFORME DE TANQUEO DE LA AERONAVE	089-5903-0712	1

B. HERRAMIENTAS Y EQUIPOS

DESCRIPCIÓN	MARCA	MODELO	SERIE
Equipo de tanqueo aeronave	Exxon	Carro tanque	UN1863
Aeronave turborreactor	Airbus / Boeing	A320 / B727	320-200 / 727-200

TIPO AERONAVE: _____ MODELO: _____ S/N _____

MATRÍCULA: _____

FECHA: _____

DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE	INSPECTOR	DURACIÓN (min)
18. Realice el control del libro de anomalías abordo.	PILOTO/TLA	IEA / UAEAC	3
19. Registre si hay o no anomalías en el libro "Log Book".	PILOTO/TLA	IEA / UAEAC	2
20. En caso de anomalía, realice el procedimiento de revisión de la misma.	TLA	IEA / UAEAC	30
CONTROL EN TIERRA			
21. Realice el control rutinario de aeronave: Control de tubos pito-estáticos, control de superficies hipersustentadoras, control de trenes y ruedas, control revisión exterior de motores, revisión general del fuselaje, revisión de luces.	PILOTO/TLA	IEA / UAEAC	15
22. Revise plan de vuelo propuesto inicial.	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	10
23. Revise condiciones climatológicas al momento.	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	3
24. Revise distancias y realice cálculos de combustible necesario (combustible necesario para el trayecto + sobrevuelo + 30 minutos aeropuerto más cercano)	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	10
25. Seleccione ruta para cumplir con el plan de vuelo.	PILOTO / GROUND CONTROL	IEA / UAEAC	2
26. Solicite el suministro de combustible para la aeronave, de acuerdo a la cantidad de combustible requerido calculado	PILOTO	IEA / UAEAC	3
27. Verifique que la cantidad de combustible suministrada sea la solicitada	PILOTO	IEA / UAEAC	2
CONTROL EN VUELO			
28. Revise periódicamente los indicadores abordo de la aeronave (combustible, potencia de motores, velocidad real, velocidad respecto a tierra, altitud, VNE, ADF, GPS, superficies hipersustentadoras, demás indicadores de acuerdo al manual y procedimiento de vuelo regular)	PILOTO	IEA / UAEAC	45
29. Revise periódicamente el radar meteorológico para verificar que no hayan cambios en las condiciones climáticas en la ruta. En caso de cambio	PILOTO	IEA / UAEAC	N/A

