



OACI

Doc 9889

# Manual sobre la calidad del aire en los aeropuertos

Segunda edición, 2020



Aprobado por la Secretaría General y publicado bajo su responsabilidad

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL





OACI

Doc 9889

# Manual sobre la calidad del aire en los aeropuertos

Segunda edición, 2020

Aprobado por la Secretaria General y publicado bajo su responsabilidad

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL

Publicado por separado en español, árabe, chino, francés, inglés y ruso,  
por la ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL  
999 Robert-Bourassa Boulevard, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7

La información sobre pedidos y una lista completa de los agentes de ventas  
y libreros pueden obtenerse en el sitio web de la OACI: [www.icao.int](http://www.icao.int)

**Doc 9889, *Manual sobre la calidad del aire en los aeropuertos***

Número de pedido: 9889

ISBN 978-92-9265-342-2

© OACI 2021

Reservados todos los derechos. No está permitida la reproducción de ninguna  
parte de esta publicación, ni su tratamiento informático, ni su transmisión, de  
ninguna forma ni por ningún medio, sin la autorización previa y por escrito de  
la Organización de Aviación Civil Internacional.







# ÍNDICE

	<i>Página</i>
<b>Preámbulo .....</b>	<b>(ix)</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>(xi)</b>
<b>Acrónimos y abreviaturas .....</b>	<b>(xiii)</b>
<b>Publicaciones de la OACI .....</b>	<b>(xvii)</b>
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1-1</b>
1.1 Propósito .....	1-1
1.2 El Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación .....	1-1
1.3 Antecedentes .....	1-2
1.4 Evaluación de la calidad del aire .....	1-3
<b>Capítulo 2. Marco normativo e impulsores/motivadores .....</b>	<b>2-1</b>
2.1 Introducción .....	2-1
2.2 Impulsores/motivadores para la acción .....	2-2
2.3 Reglamentos sobre calidad del aire local y reglamentación de contaminantes.....	2-3
2.4 Normas y reglamentos sobre emisiones de motores de aeronaves y vehículos terrestres .....	2-6
2.5 Modificación de los reglamentos y objetivos tecnológicos.....	2-9
2.6 Respuestas de reglamentación .....	2-9
<b>Capítulo 3. Inventario de emisiones .....</b>	<b>3-1</b>
3.1 Introducción .....	3-1
3.2 Parámetros del inventario de emisiones.....	3-2
3.3 Especies de emisiones.....	3-3
3.4 Fuentes de emisiones relacionadas con el aeropuerto .....	3-4
3.5 Emisiones locales y regionales .....	3-6
3.6 Garantía de calidad .....	3-6
3.7 Pronosticación.....	3-7
<b>Apéndice 1. Metodologías para el cálculo de emisiones de los motores de las aeronaves.....</b>	<b>3-A1-1</b>
<b>Apéndice 2. Emisiones de los servicios de escala a las aeronaves .....</b>	<b>3-A2-1</b>
<b>Apéndice 3. Fuentes de emisiones relacionadas con infraestructura y estacionarias.....</b>	<b>3-A3-1</b>
<b>Apéndice 4. Emisiones del tránsito de vehículos.....</b>	<b>3-A4-1</b>



	<i>Página</i>
<b>Capítulo 4. Distribución temporal y espacial de las emisiones.....</b>	<b>4-1</b>
4.1 Introducción.....	4-1
4.2 Consideraciones generales sobre la distribución de las emisiones.....	4-2
4.3 Distribución espacial.....	4-5
4.4 Distribución temporal.....	4-6
4.5 Empleo de modelos computarizados .....	4-7
4.6 Formato y notificación de los datos .....	4-8
<b>Capítulo 5. Modelos de dispersión .....</b>	<b>5-1</b>
5.1 Introducción.....	5-1
5.2 Requisitos e impulsores/motivadores externos .....	5-1
5.3 Conceptos generales sobre dispersión .....	5-2
5.4 Datos de entrada requeridos para el modelo .....	5-4
5.5 Cálculo de la dispersión .....	5-8
5.6 Productos de los modelos .....	5-12
5.7 Aplicación de los modelos e interpretación de los resultados .....	5-12
<b>Apéndice 1. Reseña de las metodologías de modelización de la dispersión .....</b>	<b>5-A1-1</b>
<b>Apéndice 2. Modelos de dispersión utilizados comúnmente     en las inmediaciones de los aeropuertos .....</b>	<b>5-A2-1</b>
<b>Apéndice 3. Fuentes de información climatológica .....</b>	<b>5-A3-1</b>
<b>Capítulo 6. Mediciones de la calidad del aire ambiente para los aeropuertos.....</b>	<b>6-1</b>
6.1 Introducción.....	6-1
6.2 Requisitos e impulsores/motivadores para las mediciones de la calidad del aire .....	6-1
6.3 Plan de mediciones .....	6-2
6.4 Análisis de los datos.....	6-7
6.5 Garantía de calidad/control de calidad de las mediciones.....	6-10
<b>Apéndice 1. Descripción de métodos de medición seleccionados .....</b>	<b>6-A1-1</b>
<b>Apéndice 2. Ejemplos de métodos de medición.....</b>	<b>6-A2-1</b>
<b>Apéndice 3. Referencias (selección) .....</b>	<b>6-A3-1</b>
<b>Capítulo 7. Opciones de mitigación.....</b>	<b>7-1</b>
7.1 Introducción.....	7-1
7.2 Metodología de la planificación de la mitigación .....	7-1
7.3 Opciones de mitigación .....	7-5
<b>Apéndice del Capítulo 7. Referencias.....</b>	<b>7-A1-1</b>

---

	<i>Página</i>
<b>Capítulo 8. Interrelaciones vinculadas a los métodos para mitigar los impactos ambientales .....</b>	<b>8-1</b>
8.1 Introducción .....	8-1
8.2 Recomendaciones para evaluar las interdependencias .....	8-2
8.3 Interrelaciones operacionales para operaciones en tierra .....	8-3
8.4 Interrelaciones operacionales para las salidas .....	8-4
8.5 Interrelaciones operacionales para las llegadas .....	8-6
8.6 Ejemplos específicos — Circular 317 de la OACI .....	8-7

Referencias

---



## PREÁMBULO

1. Este manual abarca un sector de conocimientos en evolución y representa la información actualmente disponible y ya suficientemente bien establecida como para incluirse en orientaciones internacionales. El documento aborda asuntos relativos a la evaluación de la calidad del aire en los aeropuertos que o bien corresponden al ámbito de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) (como las emisiones del motor principal) o sobre los cuales existe una comprensión establecida de otras fuentes ajenas a las aeronaves (como calderas, equipo de apoyo en tierra y tránsito de superficie) que contribuirán, en mayor o menor grado, al impacto sobre la calidad del aire.
2. Existen otros posibles aspectos relacionados con las fuentes de emisiones que son pertinentes pero que no están abarcados en el presente manual (por ejemplo, efectos de la velocidad de la aeronave, influencia de las condiciones ambientales sobre las emisiones de las aeronaves, emisiones del arranque de las aeronaves, frenado de las mismas y desgaste de neumáticos) que se han identificado y son objeto de otras investigaciones por parte de la OACI, Estados miembros, organizaciones observadoras u otras organizaciones de expertos, teniendo en cuenta la experiencia práctica.
3. Esta segunda edición del manual comprende capítulos sobre el marco normativo e impulsores/motivadores para medidas sobre la calidad del aire local, prácticas sobre inventarios de emisiones y distribución temporal y espacial de las emisiones, inventarios completos sobre emisiones (incluyendo un enfoque avanzado y detallado para el cálculo de las emisiones de las aeronaves); modelos de dispersión, mediciones en los aeropuertos, opciones de mitigación e interrelaciones correspondientes a métodos para mitigar los impactos ambientales. En todo el documento, se proporcionan referencias adicionales para quienes se interesen en explorar estos temas con mayor detalle.
4. Se tiene el propósito de que este documento se mantenga actualizado y, a medida que se disponga de más conocimientos al respecto, será puesto al día en consecuencia. Se agradecería recibir comentarios sobre este manual, en particular con respecto a su aplicación y utilidad. Estos comentarios se tendrán en cuenta en la preparación de ediciones posteriores. Se ruega enviar los comentarios en cuestión a:

Secretario General  
Organización de Aviación Civil Internacional  
999 Robert-Bourassa Boulevard  
Montréal, Quebec H3C 5H7  
Canada

---



## GLOSARIO

**Ciclo de aterrizaje y despegue (LTO).** El LTO abarca las cuatro fases de las operaciones de aeronave: aproximación, rodaje, despegue y ascenso.

**Cuenca atmosférica.** Masa de aire que se comporta en forma coherente con respecto a la dispersión de las emisiones. Por consiguiente, para fines de los estudios de dispersión que se realicen con modelos numéricos puede considerarse como que constituye una única unidad de análisis y de gestión.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).** Gas natural que es también un subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en la utilización de terrenos y otros procesos industriales. El dióxido de carbono es el gas de referencia con respecto al cual se mide el potencial de calentamiento global de otros gases de efecto invernadero. Efectos: contribuye al cambio climático.

**Equipo auxiliar de tierra (GSE).** Amplia categoría de vehículos y equipo que prestan servicios a las aeronaves, incluyendo los utilizados para remolque, mantenimiento, carga y descarga de pasajeros y mercancías, y para proporcionar energía eléctrica, combustible y otros servicios a las aeronaves.

**Grupo auxiliar de energía (APU).** Unidad autónoma de energía en una aeronave, que se utiliza para proporcionar energía eléctrica y neumática a los sistemas de aeronave durante las operaciones en tierra.

**Grupo electrógeno de tierra (GPU).** Proporciona energía eléctrica a las aeronaves durante su tiempo en tierra.

**Keroseno.** Combustible para motores de reacción (por ejemplo, Jet-A1).

**Materia particulada (PM).** Término utilizado para describir partículas con un diámetro aerodinámico de 10 micrómetros o inferior. Desde el punto de vista físico-químico, el polvo es una mezcla compleja de componentes emitidos directamente o formados posteriormente, de origen natural y antropogénico (por ejemplo, hollín, material geológico, partículas abrasadas y material biológico) y tiene una composición muy variada (metales pesados, sulfatos, nitratos, amonio, carbonos orgánicos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas/furanos). Las PM<sub>2,5</sub> son partículas con diámetro aerodinámico de 2,5 micrómetros o inferior. Son críticas en relación con los efectos sobre la salud. La PM se forma durante los procesos de producción industrial, procesos de combustión, procesos mecánicos (abrasión de materiales de superficie y generación de polvo fugitivo) y como formación secundaria (de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> y VOC). Características: las partículas sólidas y líquidas tienen tamaños y composición variados. Efectos: las partículas finas y el hollín pueden provocar desórdenes respiratorios y cardiovasculares, aumento de la mortalidad y riesgo de cáncer; la deposición de polvos puede causar contaminación del terreno y las plantas y también, a través de la cadena alimentaria, exposición humana a metales pesados y dioxinas/furanos contenidos en el polvo.

**Monóxido de carbono (CO).** Gas incoloro e inodoro formado durante la combustión incompleta de combustibles para calefacción y motores. Efectos: el CO actúa como veneno respiratorio en los humanos y animales de sangre caliente. Desempeña una función en la formación de ozono en la troposfera libre.

**Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>).** Término genérico que abarca el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el monóxido de nitrógeno (NO). Debido a que el NO se oxida rápidamente a NO<sub>2</sub>, las emisiones se expresan en términos de equivalentes de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Los óxidos de nitrógeno se forman durante la combustión de los combustibles para calefacción y motores, especialmente a altas temperaturas. Características: el NO es un gas incoloro, convertido en la atmósfera a NO<sub>2</sub>; el NO<sub>2</sub> toma un color rojizo a elevadas concentraciones. Efectos: desórdenes respiratorios, grandes daños a plantas y ecosistemas sensibles mediante la acción combinada de varios contaminantes (acidificación) y sobrefertilización de ecosistemas.

**Sistema de control ambiental (ECS).** El aire de sangrado del APU se suministra a los equipos de climatización de la aeronave, que proporcionan aire acondicionado a la cabina. Para los ensayos de emisiones se establece una condición de carga de sangrado para una operación típica de aeronave en la puerta (dependiendo del tipo y tamaño de la aeronave) que normalmente comprende alguna carga (eléctrica) de eje.

**Sistema energético fijo (FES).** Sistema en los puestos de estacionamiento de aeronaves (distantes o en andén) que proporciona energía (electricidad y a veces aire acondicionado) producida centralmente a las aeronaves durante su tiempo en tierra.

**Sobre el nivel del terreno (AGL).** Altura por encima de la elevación conocida de la pista o del terreno.

**Unidad de climatización (ACU).** Equipo de compresor autopropulsado o montado en remolque para proporcionar aire acondicionado a las aeronaves durante el tiempo que permanecen en tierra.

---

## ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AAL	Sobre el nivel del aeródromo
ACARE	Consejo asesor para la investigación aeronáutica en Europa
ACU	Unidad de climatización
ADAECAM	Método avanzado para el cálculo de emisiones de las aeronaves
ADMS	Sistema de modelización de la dispersión atmosférica (Reino Unido)
AEDT	Herramienta de diseño ambiental de la aviación (FAA de los Estados Unidos)
AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente
AESA	Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea
AFR	Relación aire-combustible
AGL	Sobre el nivel del terreno
ALAQs	Estudios de calidad del aire local de los aeropuertos (EUROCONTROL)
AMSL	Sobre el nivel medio del mar
ANSP	Proveedor de servicios de navegación aérea
APMA	Contaminación del aire en las megaciudades de Asia
APU	Grupo auxiliar de energía
ARFF	Servicio de salvamento y extinción de incendios en aeropuertos
ARP	Punto de referencia de aeródromo
ASQP	Performance de calidad del servicio de las líneas aéreas
ASU	Compresor de arranque
ATA	Asociación del transporte aéreo
ATOW	Peso de despegue real
Avgas	Gasolina de aviación
BADA	Base de datos de aeronaves
BAM	Monitor de masa de atenuación beta
BFFM2	Flujo de combustible método 2 de Boeing
bhp	Potencia al freno
BPR	Relación de dilución
BTS	Oficina de Estadísticas de Transporte (Estados Unidos)
CAEP	Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación
CDO	Operaciones en descenso continuo
CERC	Consultores de Investigación Ambiental de Cambridge (Reino Unido)
CH <sub>4</sub>	Metano
CI	Índice de carbono
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNG	Gas natural comprimido (combustible)
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DAC	Combustor de doble anillo
DEFRA	Departamento de Asuntos Ambientales, Alimentarios y Rurales (Reino Unido)
DfT	Departamento de Transporte (Reino Unido)
DLR	Deutsches Zentrum für luft-und Raumfahrt
DOAS	Espectroscopia de absorción óptica diferencial
DOT	Departamento de Transporte (Estados Unidos)
ECS	Sistema de Control Ambiental
EDMS	Sistema de Modelización de Emisiones y Dispersión (FAA de los Estados Unidos)
EEDB	Banco de datos sobre las emisiones de los motores (OACI)



---

EGT	Temperatura de los gases de escape
EI	Índice de emisión
EPA	Agencia de Protección del Medio Ambiente (Estados Unidos)
ETFMS	Sistema táctico mejorado de gestión de afluencia (EUROCONTROL)
ETMS	Sistema mejorado de gestión de tránsito (Estados Unidos)
FAA	Administración Federal de Aviación (Estados Unidos)
FAF	Punto de referencia de aproximación final
FBO	Explotador de base fija
FDR	Registrador de datos de vuelo
FES	Sistema energético fijo
FESG	Grupo de apoyo sobre pronosticación y análisis económico del CAEP de la OACI
FIRE	Sistema de datos para la recuperación de información sobre factores (EPA Estados Unidos)
FOA	Aproximación de primer orden
FOCA	Oficina Federal de Aviación Civil (Suiza)
FOD	Daño por objetos extraños
FOI	Agencia sueca de investigaciones para la defensa
FSC	Contenido de azufre en el combustible
g	Gramo
GE	General Electric
GIS	Sistema de información geográfica
GPU	Grupo electrógeno de tierra
GSE	Equipo auxiliar de tierra
GUI	Interfaz gráfica del usuario
h	Hora
HAP	Contaminante peligroso del aire
HC	Hidrocarburo
HDV	Vehículo pesado (por ejemplo, camiones, autobuses)
hp	Caballo de potencia
Hz	Hertzio
IAE	International Aero Engines
ICCAIA	Consejo coordinador internacional de asociaciones de industrias aeroespaciales
IOAG	Guía oficial internacional de líneas aéreas
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ISA	Atmósfera tipo internacional
kg	Kilogramo
km	Kilómetro
kN	Kilonewton
kt	Nudo
KVA	Kilovoltio amperio
kW	Kilovatio
LASAT	Simulación lagrangiana de aerosoles — transporte
LASPORT	LASAT para aeropuertos (Europa)
LPG	Gas de petróleo líquido
LTO	Aterrizaje y despegue
m	Metro
MCLT	Empuje máximo de ascenso
MES	Arranque del motor principal
min	Minuto
MSDS	Hoja de datos de seguridad del material
NAAQS	Normas nacionales sobre calidad del aire ambiente (Estados Unidos)
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (Estados Unidos)
NGGIP	Programa nacional de inventarios de gases de efecto invernadero

---

NMHC	Hidrocarburos distintos del metano
NMVOC	Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano
NO	Monóxido de nitrógeno
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
NPR	Ruta preferencial en relación con el ruido
nvPM	Materia particulada no volátil
nvPMmass	Materia particulada no volátil en masa
nvPMnumber	Materia particulada no volátil en número
O <sub>3</sub>	Ozono
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPR	Relación de presión total
Pb	Plomo
PBL	Capa límite planetaria
PCA	Aire acondicionado (para enfriamiento/calefacción de aeronaves estacionadas)
PLTOW	Peso de despegue limitado por la performance
PM	Materia particulada
PM <sub>2.5</sub>	Materia particulada con diámetro aerodinámico de 2,5 micrómetros o inferior
PM <sub>10</sub>	Materia particulada con diámetro aerodinámico de 10 micrómetros o inferior
POV	Vehículo privado
PPM	Partes por millón
P&W	Pratt & Whitney
RR	Rolls Royce
s	Segundo
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices
SAEFL	Agencia para el medio ambiente, bosques y paisajes de Suiza
SHP	Potencia en el eje
SIP	Planes estatales de implantación
SN	Índice de humo
SO <sub>x</sub>	Óxidos de azufre
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
TAF	Pronósticos de área terminal (Estados Unidos)
TEOM	Microbalanza oscilante de elemento cónico
THC	Hidrocarburo total
TIM	Tiempo en el modo
TOW	Peso de despegue
UFP	Partículas ultrafinas (materia en partículas con un diámetro aerodinámico de hasta 0,1 micrómetro)
UE	Unión Europea
UID	Identificador único
UN	Naciones Unidas
µg/m <sup>3</sup>	Microgramos por metro cúbico
V	Voltio
VMT	Millas-vehículo recorridas
VOC	Compuestos orgánicos volátiles

---



# PUBLICACIONES DE LA OACI

(citadas en este manual)

## Anexos al Convenio sobre Aviación Civil Internacional

Anexo 16 — *Protección del medio ambiente*  
Volumen I — *Ruido de las aeronaves*  
Volumen II — *Emisiones de los motores de las aeronaves*

## Procedimientos para los servicios de navegación aérea

OPS — *Operación de aeronaves* (Doc 8168)  
Volumen I — *Procedimientos de vuelo*  
Volumen II — *Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos*

## Manuales

*Manual de planificación de aeropuertos* (Doc 9184)  
Parte 1 — *Planificación general*  
Parte 2 — *Utilización del terreno y gestión del medio ambiente*  
Parte 3 — *Directrices para la preparación de contratos de consultores y de construcción*

*Orientación sobre derechos por emisiones de las aeronaves relacionados con la calidad del aire local* (Doc 9884)

*Banco de datos de la OACI sobre las emisiones del escape de los motores* (Doc 9646)<sup>1</sup>

*Método recomendado para calcular las curvas de nivel de ruido en las proximidades de los aeropuertos* (Doc 9911)

*Oportunidades operacionales para reducir el consumo de combustible y las emisiones* (Doc 10013)

## Circulares

*Efectos de los procedimientos PANS-OPS de salida para atenuación del ruido en el ruido y las emisiones gaseosas* (Cir 317)

## Informes de reuniones

*Informe de la Séptima Reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP/7)* (Doc 9886)

---

1. Este documento está permanentemente agotado. La OACI proporciona los datos de certificación de emisiones en la red mundial en <http://www.easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PROPÓSITO

1.1.1 Este documento contiene asesoramiento e información práctica para ayudar a los Estados miembros de la OACI a aplicar las mejores prácticas con respecto a la calidad del aire relacionada con los aeropuertos. En todo el documento se presenta información relativa a los requisitos estatales, emisiones de fuentes aeroportuarias, inventarios de emisiones y asignación de emisiones.

1.1.2 Este documento también proporciona un procedimiento para que los Estados puedan determinar los mejores enfoques y marcos analíticos para evaluar la calidad del aire relacionada con los aeropuertos y en él se identifican las mejores prácticas para las diferentes necesidades o escenarios. No está concebido como base para medidas normativas, no se describen en él proyectos o medidas específicos ni tampoco se tratan aspectos relacionados con las investigaciones sobre la calidad del aire en los aeropuertos.

1.1.3 Debido a que este texto de orientación se elaboró para servir de posible ayuda a todos los Estados miembros de la OACI para implantar mejores prácticas en relación con la calidad del aire en los aeropuertos, tiene un carácter necesariamente amplio y extenso. Por consiguiente, algunos Estados quizás ya hayan implantado algunos, o muchos, de los procesos y medidas que se tratan en este texto de orientación. En tales casos, este texto de orientación puede utilizarse para complementar estos procedimientos y medidas o como referencia adicional.

1.1.4 Dado que este texto de orientación es de carácter amplio, no puede esperarse que proporcione el nivel de detalle necesario para ayudar a los Estados a tratar todos los aspectos que puedan surgir, considerando que pueden existir situaciones específicas de orden jurídico, técnico o político relacionadas con los aeropuertos o la calidad del aire en determinados lugares. Al igual que cualquier texto de orientación de aplicación amplia, se aconseja que los Estados lo utilicen como referencia que se ha de adaptar a circunstancias específicas.

### 1.2 EL COMITÉ SOBRE LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE Y LA AVIACIÓN

1.2.1 La OACI ha estado involucrada en el tema de las emisiones relacionadas con los aeropuertos durante muchos años. En particular, el Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP) de la OACI y su antecesor, el Comité sobre las emisiones de los motores de las aeronaves, han tratado continuamente desde finales de los años 1970 las normas sobre emisiones para nuevos tipos de motores, sus derivados y nuevos motores en producción. Uno de los resultados principales de su labor son las disposiciones de la OACI sobre emisiones de los motores que figuran en el Volumen II del Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional ("Convenio de Chicago"). Entre otros aspectos, estas disposiciones se refieren a la purga de combustibles líquidos, el humo y las siguientes emisiones principales de gases de escape de los motores de reacción: hidrocarburos (HC), óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y monóxido de carbono (CO). Concretamente, establecen límites a las cantidades de humo y emisiones gaseosas de estos tres contaminantes en el escape de la mayoría de los tipos de motores civiles. Además de la innovación tecnológica y normas de certificación, el CAEP ha aplicado otros dos enfoques posibles para tratar las emisiones de la aviación:

- a) medidas operacionales alternativas en los aeródromos; y
- b) posible uso de opciones basadas en criterios de mercado para la reducción de las emisiones.

1.2.2 La OACI también ha producido varios documentos relacionados con las emisiones de las aeronaves, como por ejemplo el Doc 9184 y el Doc 10013, que reemplazó a la Circular 303.

1.2.3 El Doc 9184, Parte 2 — *Utilización del terreno y gestión del medio ambiente* proporciona orientación sobre la planificación de la utilización de los terrenos en las inmediaciones de los aeropuertos y comprende información sobre opciones disponibles para reducir las emisiones relacionadas con los aeropuertos y mejorar el rendimiento del combustible de los motores de las aeronaves.

1.2.4 El Doc 10013 identifica y examina varias oportunidades y técnicas operacionales para reducir a un mínimo el consumo de combustible y, por consiguiente, las emisiones relacionadas con las operaciones de la aviación civil. El manual profundiza la información que figuraba en la Circular 303.

1.2.5 En el contexto descrito anteriormente, el CAEP estableció que existía una necesidad complementaria de elaborar textos de orientación para ayudar a los Estados a implantar mejores prácticas relativas a la evaluación de la calidad del aire en los aeropuertos, lo que constituye el propósito de este manual.

### 1.3 ANTECEDENTES

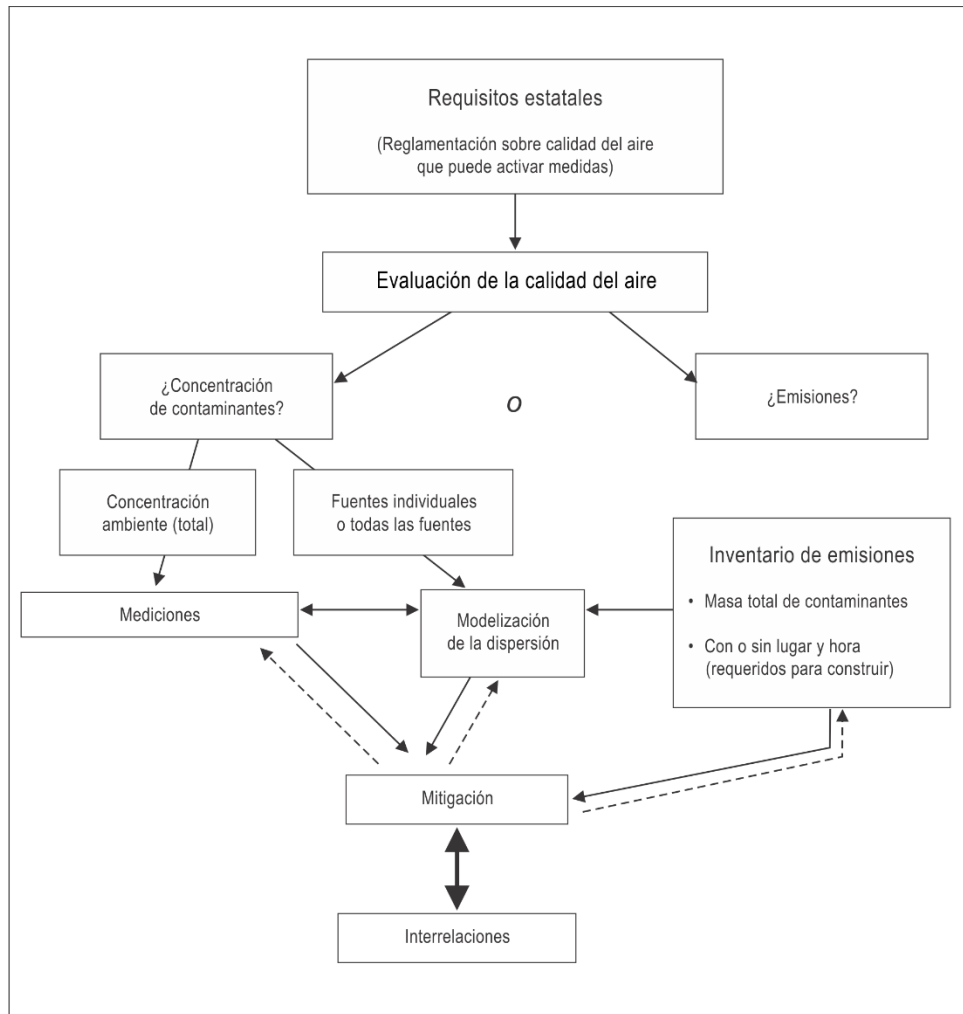
1.3.1 El interés por las emisiones de contaminantes aéreos en aeronaves y aeropuertos ha ido aumentando desde que se registró un considerable incremento en el tránsito de turborreactores comerciales en los años 1970. Por ejemplo, las emisiones de las aeronaves producen contaminantes del aire como el NO<sub>x</sub>, HC y fina materia particulada (PM), que a su vez pueden involucrar asuntos ambientales más amplios con respecto al ozono (O<sub>3</sub>), a nivel del suelo, las lluvias ácidas y el cambio climático, y presentar además posibles riesgos para la salud pública y el medio ambiente. A diferencia de la mayoría de los medios de transporte, las aeronaves recorren grandes distancias a muy variadas altitudes, generando emisiones que pueden tener consecuencias sobre la calidad del aire en los entornos locales, regionales y mundial.

1.3.2 La OACI reconoce que las fuentes de emisiones relacionadas con los aeropuertos tienen la capacidad de emitir contaminantes que pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire en las comunidades cercanas. Por ello, los programas y normas nacionales e internacionales sobre calidad del aire requieren continuamente que las autoridades aeroportuarias y los órganos gubernamentales traten los aspectos de calidad del aire en las cercanías de los aeropuertos. Análogamente, debe prestarse atención a otras posibles consecuencias ambientales relacionadas con los aeropuertos vinculadas al ruido, la calidad del agua, gestión de desechos, consumo de energía y ecología local en las cercanías de los aeropuertos, para ayudar a asegurar el bienestar a corto y largo plazo de los trabajadores aeroportuarios, los usuarios y las comunidades circundantes.

1.3.3 Es de destacar que se han realizado considerables mejoras a lo largo de los dos últimos decenios con respecto al rendimiento del combustible de las aeronaves y otras mejores técnicas para reducir emisiones. No obstante, estos progresos pueden verse neutralizados en el futuro por el crecimiento pronosticado de las operaciones aeroportuarias y otras actividades aeronáuticas. Debido a que las aeronaves son solo una de las varias fuentes de emisiones en los aeropuertos, también se considera fundamental gestionar eficazmente las emisiones de las instalaciones terminales, de mantenimiento y de calefacción, el equipo auxiliar de tierra del aeropuerto (GSE) y los diversos medios de transporte de alrededor, hacia y desde los aeropuertos. La optimización del diseño, la disposición y trazado del aeropuerto así como de su infraestructura, la modificación de las prácticas operacionales para mayor rendimiento, el reequipamiento de la flota GSE con tecnologías de pocas o ningunas emisiones y la promoción de otros modos de transporte terrestre benignos para el medio ambiente son algunas de las oportunidades actuales que los aeropuertos y el resto de la industria aeronáutica pueden adoptar o aplicar para contribuir al logro de estos objetivos y fomentar el desarrollo sostenible del transporte aéreo comercial.

### 1.4 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

1.4.1 En la mayoría de las regiones, la calidad del aire se regula mediante una combinación de reglamentos<sup>1</sup> nacionales, regionales o locales que establecen normas para las fuentes de emisiones o niveles del medio ambiente (es decir exteriores) de varios contaminantes y definen también los procedimientos para alcanzar el cumplimiento de estas normas. Por ejemplo, en la Figura 1-1 se muestra la relación de los principales requisitos de una evaluación de la calidad del aire que reflejan este marco jurídico.



**Figura 1-1. Elementos de la calidad del aire local y sus interacciones**

1. En este texto de orientación se utiliza generalmente el término “reglamentos” para referirse a leyes y reglamentos nacionales sobre calidad del aire (que pueden incluir reglamentos nacionales adoptados para incorporar las Normas de la OACI sobre emisiones de los motores de las aeronaves) y el término “normas” cuando se hace referencia a las Normas de la OACI sobre emisiones de los motores. No obstante, algunos reglamentos nacionales sobre calidad del aire son llamados también “normas” (por ejemplo, las Normas nacionales sobre calidad del aire ambiente, o NAAQS, en los Estados Unidos). Cuando los planes nacionales hacen referencia a sus propias disposiciones sobre calidad del aire como “normas”, esa terminología se utilizará en esta orientación al referirse a esas disposiciones. Para evitar confusiones en la terminología, la orientación se referirá específicamente a las Normas de la OACI sobre emisiones de los motores como “Normas de la OACI”.



1.4.2 Como se ve, los dos principales sectores de una evaluación de la calidad del aire son:

- a) los inventarios de emisiones; y
- b) la modelización de la dispersión de concentraciones de contaminantes.

El inventario de emisiones proporciona la masa total de las emisiones liberadas al medio ambiente y constituye la base para la notificación, el cumplimiento y la planificación de la mitigación, pudiéndose utilizar también como insumo para moderar las concentraciones de contaminantes. Para relacionar las emisiones con las concentraciones de contaminantes, debe evaluarse también la distribución espacial y temporal de las mismas. Este enfoque mixto de utilizar inventarios de emisiones y modelos de dispersión permite evaluar las concentraciones históricas, existentes y futuras de contaminantes en las inmediaciones de los aeropuertos o de cada fuente de emisiones.

1.4.3 Las concentraciones de contaminantes existentes también pueden evaluarse midiendo (por ejemplo, muestreo y monitoreo) las condiciones ambientales, aunque este método de evaluación puede incluir contribuciones de otras fuentes cercanas y distantes, entre ellas algunas no relacionadas con el aeropuerto. Dependiendo de la tarea específica, pueden utilizarse resultados de modelos computarizados y mediciones ambientales para evaluar las condiciones existentes o históricas. En contraste, las condiciones futuras sólo pueden simularse utilizando modelos computarizados.

1.4.4 Los elementos inventario de emisiones, modelos de concentración y mediciones ambientales de una evaluación de la calidad del aire pueden utilizarse individualmente o en combinación para ayudar al proceso de comprender, notificar, cumplir o planificar medidas de mitigación proporcionando información sobre las condiciones generales, así como las contribuciones de fuentes específicas.

1.4.5 Las medidas subsiguientes de mitigación para la calidad del aire u otras medidas implantadas (con debida consideración de las interrelaciones, principalmente, el ruido y otros impactos ambientales del aeropuerto) pueden tener otros resultados beneficiosos para la masa total de emisiones, los resultados de los modelos de concentración y las concentraciones medidas.

---

## Capítulo 2

### MARCO NORMATIVO E IMPULSORES/MOTIVADORES

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1 Los Estados (y sus delegados) han adoptado históricamente reglamentos sobre la calidad del aire local para proteger la salud pública y el medio ambiente natural. La calidad del aire local puede describirse en términos generales como la condición del aire ambiente a la cual los humanos y la naturaleza están normalmente expuestos. En la mayoría de los casos, la determinación de la calidad del aire se basa en la concentración de contaminantes (tanto de fuentes naturales como antropogénicas). Estas concentraciones se comparan con los reglamentos y normas establecidos para definir niveles aceptables de la calidad del aire local, incluyendo las medidas necesarias para alcanzarlos. Muchos aspectos relativos a la calidad del aire local dentro y alrededor de los aeropuertos son objeto también de estos mismos reglamentos. En este contexto, existen diferentes y variadas presiones sobre los Estados con respecto a la calidad del aire en las inmediaciones de los aeropuertos, que comprenden:

- a) deterioro de la calidad del aire local que conduce a márgenes reducidos respecto a los reglamentos existentes;
- b) creciente conocimiento de las consecuencias sanitarias, que lleva a la introducción de nuevos reglamentos, incluyendo el agregado de nuevas especies contaminantes;
- c) restricciones a la construcción o urbanización resultantes de las limitaciones impuestas por la necesidad de satisfacer los reglamentos sobre calidad del aire local;
- d) mayores expectativas del público respecto de los niveles de la calidad del aire local; y
- e) creciente preocupación del público sobre los efectos de las aeronaves.

2.1.2 Estas presiones también deben considerarse en el contexto más amplio de las otras presiones sobre la aviación — principalmente el posible impacto de las emisiones de la aviación sobre el clima, las consecuencias del ruido de la aviación sobre las comunidades y la situación económica de la industria aeronáutica. Estas presiones adicionales traen aparejadas sus propias medidas económicas y normativas que, en la mayoría de los casos, plantean problemas de compensación entre sí y con la calidad del aire local en las inmediaciones de los aeropuertos.

2.1.3 Normalmente, los entornos aeroportuarios comprenden una mezcla compleja de fuentes de emisiones incluyendo aeronaves, GSE, edificios terminales y tránsito de vehículos terrestres. Para cualquier Estado, existe a menudo una mezcla compleja correspondiente de reglamentos y normas vigentes que abarcan muchas de las fuentes de emisiones presentes en los aeropuertos (por ejemplo, motores de aeronaves, motores de vehículos de transporte, plantas generadoras de electricidad o calor e instalaciones de mantenimiento de aeronaves). A este respecto, se establecen por lo general con carácter nacional reglamentos que abarcan fuentes distintas de las aeronaves. Por comparación, las Normas sobre emisiones para motores de aeronaves se convienen internacionalmente a través del CAEP de la OACI y, posteriormente, se incluyen en los reglamentos nacionales de cada Estado miembro de la OACI.

2.1.4 En la mayoría de los países, las autoridades nacionales establecen los principios rectores y los objetivos para el logro y mantenimiento de condiciones aceptables de la calidad del aire. Conjuntamente con las autoridades regionales y locales, también tienen importantes tareas a realizar en cuanto a la toma de mediciones de la calidad del aire, implantación de planes y programas correctivos e información al público general sobre asuntos relativos a las condiciones de la calidad del aire local.

## 2.2 IMPULSORES/MOTIVADORES PARA LA ACCIÓN

2.2.1 Los reglamentos sobre calidad del aire local, desde su comienzo, se han basado en la necesidad de proteger la salud pública y el medio ambiente natural. Entre los primeros ejemplos de reglamentos sobre calidad del aire local se cuentan los controles de calidad de aire local de 1881 en Chicago y Cincinnati. Estos reglamentos iniciales se concentraban en los productos más visibles del quemado de combustible y desechos, concretamente el humo y las partículas. Para mediados del siglo XX, la reglamentación de las emisiones para reducir el humo pasó del nivel local al nivel nacional con la introducción de leyes nacionales sobre calidad del aire en la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (1949), los Estados Unidos (1955) y el Reino Unido (1956).

2.2.2 En el caso del reglamento de 1956 del Reino Unido, el Gran Smog de 1952 fue el motivador de medidas legislativas conjuntamente con un considerable aumento en la tasa de mortalidad de las personas que sufrían de enfermedades respiratorias y cardiovasculares relacionadas con este hecho. La Ley de Aire Limpio de 1956 resultante concentraba su atención en la reducción de la contaminación por humo relacionado con fuentes industriales.

2.2.3 En los Estados Unidos, la Ley de Control de la Contaminación del Aire de 1955 fue solo el comienzo de una serie de medidas adoptadas para mejorar la calidad del aire local, que afectaban a una amplia gama de industrias. Importantes revisiones en 1963 dieron como resultado la Ley de Aire Limpio, con reglamentos adicionales que abarcaban el transporte a largas distancias, la generación de electricidad y varias actividades industriales. Al mismo tiempo, el gobierno federal estableció la Agencia de protección del medio ambiente (EPA) de los Estados Unidos, y en 1971 se introdujeron las Normas nacionales sobre calidad del aire ambiente (NAAQS). Estas normas establecían reglamentos sobre la calidad del aire a nivel nacional que abarcaban seis contaminantes<sup>1</sup> y estipulaban que las normas debían cumplirse para 1975. En 1990, extensas enmiendas de la Ley de Aire Limpio ajustaron considerablemente estos requisitos.

2.2.4 Estos requisitos jurídicos, establecidos para la protección de la salud pública y el medio ambiente, crearon impulsores para la acción en muchas industrias (incluyendo la aviación) así como la necesidad de cumplir los reglamentos. En algunos casos, el cumplimiento de las normas sobre calidad del aire en declaraciones y evaluaciones sobre el impacto ambiental pasaron a ser una consideración requerida para las iniciativas de desarrollo.

2.2.5 Paralelamente a los reglamentos sobre calidad del aire local, la creciente conciencia y expectativas del público respecto de la calidad del aire, expresadas en los medios de difusión, gobiernos y grupos de intereses, también aplicaron presiones sobre la industria aeronáutica. Estas iniciativas también sirvieron de motivadores para que la industria aeronáutica informara públicamente y, cuando correspondiera, tratara de satisfacer estas expectativas.

2.2.6 Entre las opciones abiertas a la industria aeronáutica en respuesta de estos motivadores figura el control de las emisiones de los motores de las aeronaves. En 1971, la OACI publicó el Anexo 16, *Protección del medio ambiente*, Volumen I — *Ruido de las aeronaves* seguido, en 1981, del Volumen II — *Emisiones de los motores de las aeronaves*. Estas Normas abarcaron la prohibición de la purga de combustible y la limitación de las emisiones de HC, CO, NO<sub>x</sub> y humo, este último en forma de índice de humo (SN). Las nuevas Normas abarcarán las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de materia particulada no volátil (nvPM) (en masa y en número).

2.2.7 Las Normas de la OACI sobre emisiones de los motores se aplican mediante procesos de certificación nacionales y multinacionales de los motores de turborreacción y turbofan con empuje superior a 26,7 kilonewtons (kN) pero no a los motores turbohélice, turbomotores y de pistón o a los grupos auxiliares de energía (APU). Las Normas de la OACI se basan en la performance de los motores no instalados medida con respecto a un ciclo de aterrizaje y despegue (LTO) idealizado de hasta 914 m (3 000 ft) por encima del nivel del terreno (AGL). Los procedimientos de certificación se llevan a cabo en un único motor en una celda de ensayo, con referencia a un nivel del mar estático y a condiciones de la Atmósfera tipo internacional (ISA). Se reconoce ampliamente que las Normas de la OACI aplicadas en la certificación difieren con respecto a las emisiones reales de las aeronaves que ocurren en lugares y situaciones operacionales

---

1. Monóxido de carbono (CO), plomo (Pb), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), materia particulada, ozono dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). La materia particulada se subdivide en partículas inferiores o iguales a 10 micrones (PM<sub>10</sub>) y PM inferiores o iguales a 2,5 micrones (PM<sub>2.5</sub>).

específicos. No obstante, algunos Estados aplican actualmente las Normas de la OACI como valores por defecto para algunos fines de evaluación de la calidad del aire local. Por lo tanto, una de las finalidades principales de este documento consiste en proporcionar una metodología que produzca una evaluación de las emisiones reales de los motores de las aeronaves más exacta que la aplicación de las Normas de la OACI por defecto.

2.2.8 Finalmente, cabe señalar que la tecnología de los motores de aeronave ha alcanzado una etapa en que existen menos desarrollos que reduzcan el ruido y las emisiones conjuntamente. Con la continua motivación para reducir el impacto ambiental de las aeronaves, se amplían las necesidades de evaluar las compensaciones entre la reducción del ruido y las emisiones y las consecuencias sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (entre estas emisiones está el CO<sub>2</sub> asociado con el consumo de combustible), cuando se diseñe y opere una nueva aeronave.

## 2.3 REGLAMENTOS SOBRE CALIDAD DEL AIRE LOCAL Y REGLAMENTACIÓN DE CONTAMINANTES

2.3.1 Los reglamentos sobre calidad del aire local a menudo regulan especies de emisiones específicas, así como los contaminantes secundarios que estas emisiones pueden formar. Como resultado, estos reglamentos pueden variar y adaptarse a las condiciones y prioridades locales en los países en que se apliquen. Un ejemplo de ello es la diferencia en el énfasis que la Unión Europea (UE) y Estados Unidos asignan a NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y O<sub>3</sub>, en que muchos Estados de la UE están más preocupados con las concentraciones de NO<sub>2</sub> y Estados Unidos y otros más preocupados por las emisiones de NO<sub>x</sub>, que es un precursor del O<sub>3</sub>.

2.3.2 Los Estados también han desarrollado tradicionalmente sus propios reglamentos o directrices sobre calidad del aire local, y por consiguiente existen en el mundo varios criterios nacionales para la reglamentación. La Tabla 2-1, aunque no completa en su cobertura, se incluye para demostrar la variación que existe entre los Estados con respecto a varios contaminantes del aire. Más allá del detalle que muestra la tabla, esta variación también se amplía a la forma en que se aplican las normas numéricas. Por ejemplo, algunos reglamentos se tratan como niveles máximos aceptables, mientras que otros especifican el número de excedencias aceptables. También se incluyen en la tabla la directiva sobre Marco de calidad del aire de la UE y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) con fines de comparación. Cabe señalar que los reglamentos sobre calidad del aire local se presentan normalmente en forma de microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y para un determinado marco temporal (normalmente hora, día o año) por contaminante.

2.3.3 Es importante destacar que la Tabla 2-1 es una instantánea de los reglamentos sobre calidad del aire de los Estados en 2005, y que estos reglamentos pueden cambiar con carácter periódico. Un breve examen de la tabla muestra que los reglamentos varían según el país y pueden ser más o menos estrictos que las directrices de la OMS. Por ejemplo, en el caso del NO<sub>2</sub>, en un período de una hora la directriz de la OMS es de 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pero la variación para este contaminante es de 75 a 400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para la materia particulada de tamaño igual o menor que 10 micrones (PM<sub>10</sub>), no hay directrices de la OMS, pero los reglamentos varían de 50 a 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a lo largo de un período de 24 horas. Por contraste, para el O<sub>3</sub> no hay directrices de la OMS para una hora o 24 horas, pero existe una directriz para 8 horas de 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con variaciones en los reglamentos nacionales de 120 a 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

2.3.4 La capacidad para ajustarse a estas directrices y reglamentos nacionales depende en gran medida de variables locales que comprenden las condiciones meteorológicas, las concentraciones de fondo, la densidad de la población, tipos y tamaños de la industria y los tipos de tecnologías de control de emisiones disponibles en la región, que pueden ser limitados debido a su costo. Las directrices de la OMS recomiendan que los reglamentos abarquen ciertos marcos temporales de 1 hora, 8 horas, 24 horas o un año.

2.3.5 También hay partes del mundo que no cuentan con reglamentos sobre calidad del aire local. En algunos países en desarrollo, sólo recientemente se ha registrado una rápida urbanización e industrialización que ha resultado en la intensificación de la contaminación del aire y del deterioro de la calidad del aire local a niveles que pueden merecer atención específica o medidas correctivas.

Tabla 2-1. Reglamentos sobre calidad del aire local en distintos países

País/ organización	Reglamento	Contaminante (período promedio)													
		Dióxido de azufre			Dióxido de nitrógeno			Monóxido de carbono		Ozono			PM <sub>10</sub>		
		1 hora*	24 horas	Anual	1 hora	24 horas	Anual	1 hora	8 horas	1 hora	8 horas	24 horas	24 horas	Anual	
		µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	
OMS	Directrices OMS (actualizadas en 2005)	—	20	—	200	—	40	30	10	—	100	—	50	20	
UE	Directiva del marco sobre calidad del aire	350	125	—	200	—	40	—	10	—	120	—	50	40	
Australia	Medida Nacional de Protección Ambiental para la calidad del aire ambiente	520	200	50	220	—	50	—	10	200	—	—	50	—	
Brasil	Resolución 03 del Consejo Nacional del Medio Ambiente, (CONAMA) junio de 1990 — Normas nacionales sobre calidad del aire	—	365	80	320	—	100	40	10	160	—	—	150	50	
Canadá	Objetivos nacionales sobre calidad del aire ambiente, Ley de Protección del Medio Ambiente del Canadá, junio de 2000	900	300	60	400	200	100	35	15	160	—	50			
China	Normas de calidad del aire ambiente GB3095 — 2012	150	50	20	200	80	40	10	—	160	100	—	50	40	
Estados Unidos	NAAQS (2008 – 2011)	210	—	—	200	—	100	43	10	—	160	—	150	50	
India	Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiente, notificadas el 18 de noviembre de 2009	—	80	50	—	80	40	4	2	—	100	—	100	60	
Japón	Normas de calidad del medio ambiente del Ministerio del Medio Ambiente	260	100	—	75–110	—	—	12	25	120	—	—	—	—	
Sudáfrica	Ley de Calidad del Aire (Núm. 39 de 2004) (SANS 1929: 2011)	350	125	50	200	—	40	30	10	—	120	—	75	40	
Suiza	Swiss Luftreinhalteverordnung (LRV)	—	100	30	—	80	30	—	—	120	—	—	50	20	

µg/m<sup>3</sup> = microgramos por metro cúbico.  
\* Los períodos de tiempo indicados corresponden a los de medición de las concentraciones promedio de contaminantes.

2.3.6 En respuesta a las recomendaciones de la Agenda 21<sup>2</sup> del Plan de las Naciones Unidas para la aplicación de las decisiones de la Cumbre Mundial de 2002 sobre Desarrollo Sostenible, se estableció el Marco Estratégico. Este Marco Estratégico para la gestión de la calidad del aire en Asia tiene por objeto proporcionar un enfoque regional para mejorar la calidad del aire local urbano facilitando el establecimiento de prioridades sobre calidad del aire local y proporcionando orientación sobre el desarrollo institucional y mejoras de la capacidad. El Marco Estratégico está siendo propuesto por el Proyecto sobre contaminación del aire en las megaciudades de Asia (APMA) y en la Iniciativa de aire limpio para las ciudades asiáticas. El APMA es un proyecto conjunto del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la OMS, el

2. Agenda 21: Cumbre de la Tierra — Programa de Acción surgido en Río de Janeiro, abril de 1993, ISBN: 9211005094.

Instituto de medio ambiente de Estocolmo y el Instituto de medio ambiente de Corea. El APMA abarca las megaciudades de Asia, definidas como aquellas con población de más de diez millones.<sup>3</sup> Este marco estratégico recomienda el uso de las directrices sobre calidad del aire de la OMS para establecer normas y tiempos de promedio.

2.3.7 En muchos países, las autoridades regionales y locales realizan el monitoreo de la calidad del aire local pero también tienen una importante tarea en la adopción de medidas correctivas, implantación de planes de gestión y otros programas para satisfacer los requisitos de los reglamentos sobre calidad del aire local.

2.3.8 La creciente urbanización constituye la preocupación de muchos países y existe la tendencia de que los aeropuertos atraigan nuevas áreas de construcción y desarrollo. Algunos Estados aplican las medidas disponibles sobre planificación del uso de terrenos para gestionar este crecimiento a efectos de evitar el desarrollo incompatible de los terrenos circundantes y que invadan los límites aeroportuarios. También es práctica común proporcionar una especie de zona tampón para el ruido y las emisiones relacionadas con los aeropuertos. Los permisos de planificación para la creación o ampliación de los aeropuertos exigen consultas con importantes partes interesadas y encargados de decisiones estratégicas a nivel nacional, regional y local. Esto normalmente comprenderá la participación de autoridades ferroviarias, de carreteras y de planificación.

2.3.9 Por ejemplo, en el Reino Unido, aunque el gobierno está comprometido con los reglamentos obligatorios de la UE sobre calidad del aire local, también ha establecido objetivos nacionales en su estrategia sobre calidad del aire. Estos objetivos tienen una condición jurídica diferente de los valores límite de la UE, pero forman parte de un acuerdo conjunto de servicios públicos del Departamento de Transporte/Departamento de asuntos ambientales, alimentarios y rurales (DfT/DEFRA) y contribuye a fortalecer decisiones sobre el futuro desarrollo de la aviación en el Reino Unido.

2.3.10 Desde diciembre de 1997, cada autoridad local del Reino Unido ha estado ejecutando un programa de examen y evaluación de la calidad del aire en su área correspondiente. Esto implica medir la contaminación del aire y tratar de predecir cómo cambiará en los próximos años. El propósito de la labor es asegurar que se alcancen los objetivos nacionales sobre calidad del aire en todo el Reino Unido. Estos objetivos se han establecido para proteger la salud humana y el medio ambiente natural. Si una autoridad local identifica algún sector en que no es probable que se alcancen los objetivos, debe declarar un área de gestión de la calidad del aire en ese sector. Esta área podría abarcar una o dos calles o ser mucho mayor. Entonces la autoridad local puede establecer un plan de acción sobre calidad del aire local para mejorar dicha calidad.

2.3.11 Dentro de la UE, la calidad del aire local también está regulada por la Directiva 2008/50/EC, que consolidó la mayor parte de la legislación existente [excepto las normas relativas a metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)] en una directiva única que abarca: SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, nuevas normas para PM<sub>2,5</sub>, benceno y Pb. La Directiva se corresponde con las recomendaciones de la OMS para Europa.<sup>4</sup>

2.3.12 Históricamente, muchos de los grandes centros aeroportuarios existentes eran originalmente pequeños aeródromos que fueron evolucionando, y ha resultado difícil gestionar su ubicación y la proximidad de áreas urbanas o residenciales. Por ejemplo, en Hong Kong, el viejo aeropuerto Kai Tak, que exigía aproximaciones extremadamente difíciles sobre áreas densamente pobladas, ha sido sustituido por una instalación totalmente nueva. El nuevo aeropuerto internacional de Hong Kong se ha construido deliberadamente lejos de los principales centros de población de modo que las aeronaves no tienen que efectuar despegues y aterrizajes por encima de áreas urbanas densamente pobladas, y las nuevas aproximaciones nocturnas se realizan sobre el agua en vez de hacerlo sobre centros poblados. Esto ha resultado beneficioso desde el punto de vista del ruido y de las emisiones locales, aunque en el caso particular de Hong Kong, el Consejo asesor para el medio ambiente no estableció una conexión entre la reubicación del aeropuerto y la calidad del

---

3. Bangkok, Beijing, Calcutta, Chongqing, Guangzhou, Hong Kong, Kathmandu, Manila, Mumbai, Nueva Delhi, Osaka, Seul, Shanghai, Singapur, Taipei, y Tokyo.

4. *Directrices sobre calidad del aire para Europa*, segunda edición, Publicaciones regionales de la OMS, Serie europea, núm. 91.

aire local.<sup>5</sup> En las regiones que tienen espacio o quizás aspectos geográficos para hacer lugar a esa planificación y pueden posteriormente prevenir la penetración de desarrollos incompatibles, la medida resulta claramente beneficiosa. Se han logrado más reducciones de las emisiones locales mediante la construcción de una amplia red de transporte público de modo que los vehículos terrestres no tienen por qué ser el método principal de acceder a los aeropuertos para el público viajero.

2.3.13 La EPA de los Estados Unidos reglamenta la calidad del aire local mediante la Ley de aire limpio y las NAAQS, como se señaló anteriormente. Las zonas con concentraciones de contaminantes superiores a las NAAQS, o que contribuyen a un rebase de las normas en zonas vecinas, se designan como zonas de incumplimiento. El monitoreo de la calidad del aire se utiliza para determinar el cumplimiento de las NAAQS y establecer los límites geográficos de estas zonas de incumplimiento.

2.3.14 La consecuencia del incumplimiento es que los Estados deben presentar Planes estatales de implantación (SIP) identificando medidas específicas para mejorar la calidad del aire local y lograr el cumplimiento de las NAAQS. Las entidades reglamentadas dentro de la zona de incumplimiento, así como las autoridades de planificación del uso de terrenos y de transporte, deben entonces adherirse al SIP. De no hacerlo, son objeto de sanciones impuestas por la EPA de los Estados Unidos, normalmente en término de penalidades civiles o en forma de una prohibición de futuros desarrollos y construcciones de una determinada nueva fuente de emisiones.

2.3.15 Además de la reglamentación relativa a la PM<sub>10</sub>, la EPA de los Estados Unidos tiene NAAQS que reglamentan la materia en partículas de hasta 2,5 micrones (PM<sub>2.5</sub>). Los reglamentos sobre el PM<sub>2.5</sub> se aplican a períodos de 24 horas y períodos de tiempo medio anuales. Los reglamentos permiten que solo se sobrepase una vez la norma de 24 horas en un año civil en promedio en un período de tres años. Cabe señalar que, en el momento de entrada en vigor de la reglamentación de PM<sub>2.5</sub>, había más aeropuertos de servicio comercial en las zonas de incumplimiento de PM<sub>2.5</sub> (53, sin incluir los aeropuertos de la aviación general o militares) que en las zonas de incumplimiento de PM<sub>10</sub> (38).

## 2.4 NORMAS Y REGLAMENTOS SOBRE EMISIONES DE MOTORES DE AERONAVES Y VEHÍCULOS TERRESTRES

2.4.1 Actualmente los reglamentos y normas que afectan a las aeronaves y otras fuentes aeroportuarias de emisiones se dividen normalmente en dos categorías claras:

- a) **Medidas que establecen límites sobre determinadas fuentes de emisiones.** Estas comprenden las Normas de la OACI sobre las emisiones de los motores de las aeronaves (adoptadas en reglamentos nacionales y multinacionales) y medidas nacionales que establecen límites para fuentes distintas de las aeronaves, como instalaciones fijas (por ejemplo, calderas, generadores, incineradores) y vehículos terrestres; y
- b) **Reglamentos nacionales** (en algunos Estados denominados “normas”) que establecen concentraciones de contaminantes ambientes para condiciones de calidad del aire local (por ejemplo, valores límite para la calidad del aire local).

2.4.2 Esta separación resulta importante debido a que, si bien en cada fuente de emisiones que funcione en un determinado aeropuerto o en sus cercanías puede satisfacer límites correspondientes a ese tipo de fuente (incluyendo las Normas de la OACI para motores de aeronaves), quizás no se satisfagan los umbrales para concentraciones de contaminantes locales. Esto puede deberse a varios factores, particulares a cada emplazamiento, incluyendo volúmenes de tránsito terrestre y aéreo, topografía, condiciones meteorológicas a corto plazo y proximidad a otras fuentes de emisiones o altos niveles de contaminación de fondo.

---

5. Monografía de ACE 25/2004, *Impacto de las emisiones de las aeronaves sobre la calidad del aire.*

2.4.3 Estudios realizados en aeropuertos confirman que las aeronaves continúan siendo un contribuyente relativamente pequeño de la contaminación regional, aunque las contribuciones de NO<sub>x</sub> relacionadas con las aeronaves podrían aumentar a medida que crece el tránsito aéreo y que otras fuentes de emisiones distintas de las aeronaves se hacen gradualmente más limpias. Por consiguiente, si bien las reducciones de las emisiones de las aeronaves (mediante medidas operacionales y de tránsito aéreo o Normas más rigurosas de la OACI sobre motores) pueden contribuir a mejorar la calidad del aire local en las inmediaciones de los aeropuertos, también es importante considerar las emisiones procedentes de los vehículos terrestres tanto regionales como locales. En este contexto, se espera que el rendimiento en cuanto a emisiones de los nuevos vehículos terrestres mejore considerablemente en los años venideros. Por consiguiente, dependiendo de las circunstancias en determinadas localidades, la propulsión relativa de las emisiones totales relacionadas con los aeropuertos que son atribuibles a las emisiones de las aeronaves podría aumentar como consecuencia de lo anterior.

2.4.4 El carácter internacional de la aviación comercial ha resultado en la elaboración de normas internacionales de certificación uniformes, preparadas en el CAEP y adoptadas por el Consejo de la OACI. Los nuevos motores de aeronaves que se certifican después de la fecha de entrada en vigor de una norma de la OACI deben satisfacer dicha norma. Las Normas de la OACI sobre emisiones de motores figuran en el Anexo 16, Volumen II, y se elaboraron originalmente para responder a preocupaciones respecto de las emisiones que afectan la calidad del aire local en las inmediaciones de los aeropuertos. Estas normas sobre motores establecen límites al NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPM y humo para un ciclo LTO de referencia de una altura de hasta 914 m (3 000 ft) por encima de la pista.

2.4.5 La rigurosidad de las Normas de la OACI sobre emisiones de NO<sub>x</sub> de los motores de las aeronaves se ha ido incrementando gradualmente desde su adopción. Adoptadas en 1981, las Normas de la OACI para NO<sub>x</sub> se hicieron más rigurosas en 1993 cuando la OACI redujo en un 20% los niveles permitidos para los motores recientemente certificados, aplicables a partir del 1 de enero de 1996, con una fecha de corte de producción del 1 de enero de 2000. En 1999,<sup>6</sup> la OACI incrementó en un promedio del 16% la rigurosidad de la norma sobre NO<sub>x</sub> para motores con nueva certificación expedida a partir del 1 de enero de 2004. En 2005, el Consejo de la OACI adoptó la decisión del CAEP de incrementar la rigurosidad de la Norma de NO<sub>x</sub> que entró en vigor el 1 de enero de 2008 en un 12% respecto de los niveles convenidos en 1999. En 2011, la OACI incrementó nuevamente la rigurosidad de la Norma de NO<sub>x</sub>, con una reducción de 15% en los niveles exigidos [a una relación de presión total (OPR) de 30] con fecha de aplicación 1 de enero de 2014. Para los motores a los que se aplican, el efecto combinado de estos cambios se ha traducido en un aumento medio del 50% de la rigurosidad respecto de las Normas originales de la OACI sobre emisiones de NO<sub>x</sub>.

2.4.6 Como resultado, el régimen de certificación de emisiones se ha hecho cada vez más estricto, y los fabricantes de motores han mejorado considerablemente el margen promedio de las Normas de la OACI. No obstante, la tendencia hacia motores más eficientes con relación de presión total (OPR) más elevado significa que las emisiones absolutas de NO<sub>x</sub> procedentes de una flota actualizada pueden no disminuir en el mismo porcentaje que el cambio en la Norma de la OACI sobre NO<sub>x</sub>.

2.4.7 La aplicación nacional de las Normas de la OACI en el proceso de certificación de motores de aeronave emplea un enfoque de "ensayo por tipo". Esto significa que el fabricante del motor debe demostrar a la autoridad certificadora mediante el uso de un número limitado de motores que el tipo de motor que se quiere certificar cumple con la norma de la OACI. Entonces, se otorga a todos los motores de este tipo una certificación de emisiones según el tipo de motor. Esta certificación también es válida para toda la vida del tipo de motor (es decir que no se requiere una verificación de emisiones después de los procedimientos de mantenimiento o reacondicionamiento). No obstante, solo hay normalmente un pequeño cambio en las emisiones durante la vida de servicio del motor, tema que se analiza en otras partes de este texto de orientación.

---

6. Los porcentajes de reducción se refieren a reducciones a una OPR de motor de 30. Las reducciones a otras OPR de motor pueden tener valores diferentes.



2.4.8 También hay Normas de la OACI respecto de la reducción del humo a niveles no visibles, utilizando una vez más la demostración del fabricante por ensayo de tipo, como se describió anteriormente. Las Normas de la OACI también exigen que el combustible no sea purgado de los principales motores de propulsión durante el apagado normal de los motores. Actualmente no existen Normas de la OACI relativas a los APU de las aeronaves.

2.4.9 Las fuentes de emisiones distintas de las aeronaves en los aeropuertos y en sus cercanías están sujetas a límites de emisiones en la fuente determinados a nivel nacional y no a normas establecidas por órganos internacionales como la OACI. La identificación y cuantificación de estas fuentes clave de emisiones distintas de las aeronaves es importante para evaluar la calidad del aire local en las cercanías de los aeropuertos. Estas fuentes comprenden otras actividades relacionadas con el aeropuerto, como los vehículos terrestres que ingresan al aeropuerto y operan en carreteras cercanas, vehículos en la parte aeronáutica como remolcadores, otros GSE, vehículos de bomberos, así como otras fuentes en la zona geográfica que se consideren pertinentes a la evaluación en el marco del plan nacional de reglamentación.

2.4.10 Como se mencionó anteriormente, los vehículos terrestres equipados con motores están normalmente reglamentados en alguna medida en los regímenes nacionales pero las formas de dicha reglamentación pueden ser diferentes. Por ejemplo, los vehículos pesados están reglamentados normalmente sobre la base de las características de performance del motor solamente (por ejemplo, en gramos por kilovatio-hora). Esto se debe a la amplia gama de vehículos (desde camiones de caja ligeros hasta vehículos articulados de 38 toneladas y autobuses) en que estos motores pueden utilizarse. En este sentido, estos reglamentos sobre fuentes de emisiones son comparables a las Normas de la OACI aplicables a los motores de aeronaves, que también se basan en el tipo de motor solamente. Para los “vehículos terrestres ligeros” (automóviles, camionetas, etc.) los reglamentos se establecen para cada combinación vehículo/motor. Por consiguiente, existe un gran número de reglamentos que abarcan los diferentes requisitos para cada combinación de tipo de vehículo, tipo de combustible, tipo de motor, régimen de potencia y dispositivos de reducción de emisiones. Dentro de la UE, los vehículos terrestres de pasajeros están reglamentados sobre la base de sus emisiones por kilómetro, utilizando ensayos de ciclo de conducción<sup>7</sup> diseñados para ser representativos de las condiciones y las cargas en la ruta. Los ciclos de ensayo son representaciones eficaces de la velocidad del vehículo en función del tiempo, y simulan un conjunto predeterminado de condiciones de conducción urbanas, rurales y en autopistas.

2.4.11 El GSE y los vehículos que operan en la parte aeronáutica también están sujetos a diversos reglamentos sobre emisiones según sus características de utilización de tipo pesado o ligero (o fuera del camino/en el camino). Por ejemplo, muchos GSE que están abarcados por las normas sobre “máquinas móviles que no son de carretera” si el vehículo no se utiliza nunca en carretera. Estos vehículos están reglamentados sobre la base de su motor solamente, normalmente con un ciclo de ensayo que representa pautas de tareas realizadas fuera de una ruta. Los vehículos utilizados en los aeropuertos que también se utilizan en rutas normales, como los camiones de bomberos o vehículos de reparto, son objeto de reglamentos estatales normales sobre emisiones terrestres, según se analizó anteriormente.

2.4.12 Por consiguiente, si bien las aeronaves, los vehículos terrestres y los vehículos de la parte aeronáutica se reglamentan aplicando procedimientos específicos (por ejemplo, que reflejan condiciones permanentes o teóricamente representativas, ya sea para el motor o para el vehículo en su totalidad), las emisiones realmente producidas en un lugar particular mostrarán probablemente diferencias con respecto a esas condiciones. Por ejemplo, la gama de vehículos terrestres ensayados es relativamente pequeña para cada combinación de vehículo/motor en producción; también existen amplias variaciones en las condiciones de tránsito, modos de conducción y condiciones meteorológicas — factores todos que influyen en los niveles reales de emisión.

---

7. El “Nuevo ciclo de conducción europeo”.

## 2.5 MODIFICACIÓN DE LOS REGLAMENTOS Y OBJETIVOS TECNOLÓGICOS

2.5.1 Los reglamentos sobre calidad del aire local están todavía en evolución y se hacen cada vez más exigentes a medida que las actividades industriales y sistemas de transporte se amplían y se comprende mejor el impacto de la calidad del aire local sobre la salud humana. La reducción de los valores límite para NO<sub>2</sub> en la UE de 200 µg/m<sup>3</sup> en 1985<sup>8</sup> a 40 µg/m<sup>3</sup> en 1999,<sup>9</sup> conjuntamente con reducciones subsiguientes establecidas en la Directiva específica 99/30/CE de la UE, son ejemplo de ello. En la Directiva específica 99/30/CE, el límite de NO<sub>2</sub> con un promedio anual de 40 µg/m<sup>3</sup> tenía un margen de tolerancia de 50% cuando se introdujo en 2001 y luego se fue reduciendo anualmente por porcentajes iguales hasta un margen de cero para 2010, de manera que la rigurosidad aumentó gradualmente en un período de diez años. Dada la continua expansión de la mayoría de los sectores de la industria, para cumplir con esta rigurosidad creciente, es necesario introducir mejoras tecnológicas en las fuentes de las emisiones relacionadas con los aeropuertos.

2.5.2 Reconociendo las crecientes presiones planteadas por posibles efectos climáticos y de calidad del aire, conjuntamente con el continuo crecimiento previsto del tránsito aéreo, las partes interesadas en la aviación han establecido sus objetivos y su visión para el futuro de las emisiones de las aeronaves a mediano y largo plazo. Los objetivos establecidos por el Consejo Asesor para la Investigación Aeronáutica en Europa (ACARE) y la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de los Estados Unidos constituyen dos ejemplos de lo anterior.

## 2.6 RESPUESTAS DE REGLAMENTACIÓN

2.6.1 A raíz de la introducción y ampliación de todos los sectores de la industria, se elaboraron reglamentos sobre calidad del aire local dirigidos a proteger la salud pública y el medio ambiente. El futuro crecimiento y ampliación significa que será cada vez más necesario que todos los sectores mejoren su eficacia y reduzcan sus emisiones netas o su régimen de emisiones en función de la productividad. Esto puede verse en las normas sobre NO<sub>x</sub> cada vez más estrictas tanto en la industria automotriz como de la aviación. Además, el mejoramiento continuo de la comprensión del impacto de diversos contaminantes en la salud pública significa que el énfasis puede cambiar de una emisión o contaminante a otro. Hasta el momento, esto ha llevado a un aumento de la severidad de las normas sobre calidad del aire local.

2.6.2 La introducción y el aumento de rigurosidad de las NAAQS de los Estados Unidos y de la Directiva marco sobre calidad del aire de la UE para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, así como una evidencia creciente de que las emisiones de partículas ultrafinas (UFP) deberían controlarse, han generado mucha actividad dentro del CAEP de la OACI, que ha tomado varias medidas de precaución. Uno de los prerrequisitos de las Normas de la OACI es que exista un medio de medición repetible y fiable, que recientemente se desarrolló para los tamaños pequeños de partículas no volátiles de los escapes de los motores de aeronave. La primera Norma de nvPM que adoptó la OACI comenzó a aplicarse el 1 de enero de 2020 a todos los motores turbofan en producción con un empuje nominal de más de 26,7 kN. Esta primera Norma de PM limita la concentración máxima de nvPM en masa (que consiste principalmente en carbono negro) y establece la obligación de notificar los índices de emisión de nvPM en masa (g/kg de combustible) y de nvPM en número (número/kg de combustible) para los cuatro modos de LTO, incluidos los valores máximos del índice de emisión (EI) medidos entre el momento en que el motor está en marcha lenta y el momento en que se encuentra en empuje máximo. Es el punto a partir del cual son aplicables las Normas de emisiones de PM para preservar la salud, tomando como base los parámetros de medición del LTO. Se prevé que, en el futuro, ya no será necesaria la medición actual de SN para los motores turbofan con un empuje nominal superior a 26,7 kN. Otra preocupación es la emisión de precursores de partículas volátiles del azufre. Como esto puede controlarse mediante el contenido de azufre en el combustible, no se prevé la elaboración de Normas de la OACI aplicables directamente a esas emisiones.

---

8. Normas relativas a la calidad del aire para el dióxido de nitrógeno, Directiva 85/203/CEE, 7 de marzo de 1985.

9. Valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente, Directiva 99/30/CE.

2.6.3 Mirando hacia el futuro, el CAEP prevé ulteriores aumentos de la rigurosidad en las Normas de la OACI sobre emisiones de motores de aeronave por LTO. En particular, se examinará el NO<sub>x</sub>, aunque las posibles reducciones se evaluarán respecto a compensaciones con el ruido, el consumo de combustible y los costos. La tecnología de motores ha alcanzado una etapa de madurez con pocas posibilidades de introducir novedades y que ya presenta ventajas plenamente beneficiosas. Por consiguiente, para todos los futuros cambios en las Normas de la OACI sobre motores será necesario proceder a una evaluación de las compensaciones con respecto a todo cambio normativo y sus consecuencias tecnológicas previsibles. A efectos de apoyar esta actividad, el CAEP ha establecido un proceso para fijar metas tecnológicas sobre NO<sub>x</sub> a mediano plazo (por ejemplo, 10 años) y largo plazo (por ejemplo, 20 años). El CAEP utilizará este proceso para determinar el grado en el cual las reducciones de NO<sub>x</sub> basadas en la tecnología resultan apropiadas para satisfacer las necesidades de calidad del aire local teniendo en cuenta al mismo tiempo otros requisitos ambientales y económicos y sus interdependencias. Estas metas facilitarán las actividades concertadas de gobiernos e industria sobre este aspecto y permitirán también contar con pronósticos y escenarios mejor informados sobre la calidad del aire relacionada con la aviación en los próximos 20 años.

---

## Capítulo 3

# INVENTARIO DE EMISIONES

### 3.1 INTRODUCCIÓN

3.1.1 Los aeropuertos y sus actividades conexas son fuente de una variedad de emisiones gaseosas y de partículas. En el contexto de la calidad del aire en los aeropuertos, la cantidad total (o masa) de las emisiones aeroportuarias que corresponden a caracterizaciones particulares es un importante valor con respecto a sus impactos relativos y aspectos de cumplimiento normativo. Este valor se determina llevando a cabo un inventario de emisiones. Los objetivos del inventario de emisiones comprenden, entre otros, los siguientes:

- a) recoger información sobre emisiones al tiempo que se vigilan las tendencias y se evalúan escenarios futuros;
- b) realizar evaluación comparativa de las emisiones con respecto a los requisitos jurídicos (por ejemplo, umbrales);
- c) crear datos de entrada para los modelos de dispersión con miras a determinar concentraciones de contaminantes; y
- d) establecer bases para un programa de mitigación.

3.1.2 Normalmente se utiliza un procedimiento de abajo a arriba para calcular los inventarios de emisiones debido a que este enfoque puede proporcionar un mayor nivel de exactitud. Para ello, el primer paso exige el cálculo de la masa de las emisiones, por fuente, período de tiempo y contaminante. Estas variables se calculan utilizando información sobre cada fuente de emisiones con sus respectivos factores de emisión (expresados como gramos por kilogramo de combustible, gramos por hora de operación o gramos por kilovatio de potencia) y los respectivos parámetros operacionales a lo largo de un período de tiempo determinado. Estos dos parámetros se utilizan posteriormente para calcular las emisiones totales relacionadas con las fuentes en el aeropuerto. La fuente de emisiones totales puede luego expresarse de diversas maneras como una fuente individual o grupo de fuentes, por contaminante o por período de tiempo (por ejemplo, hora, día, semana, mes o año).

3.1.3 Para elaborar un inventario de emisiones, se requieren los pasos siguientes:

- a) definir parámetros generales del inventario tales como la finalidad, perímetro espacial y funcional y frecuencia de actualización;
- b) determinar las especies de emisiones que han de considerarse;
- c) determinar las fuentes de emisiones existentes;
- d) cuantificar las emisiones de esas fuentes;
- e) considerar aspectos de macroescala (inventarios de emisiones regionales) a la medida que corresponda; y
- f) implantar medidas de garantía de calidad y de control (para caracterizar incertidumbres y limitaciones de los datos).

### 3.2 PARÁMETROS DEL INVENTARIO DE EMISIONES

3.2.1 Al elaborar un inventario de emisiones deberían considerarse los factores siguientes:

- a) **Finalidad del inventario.** El uso y la necesidad de un inventario de emisiones determinan en gran medida su diseño. Si el requisito es únicamente calcular la masa total de emisiones, entonces las metodologías utilizadas serán sencillas y directas. Si el inventario se ha de utilizar como parte de un modelo de dispersión, las metodologías podrían ser distintas y más detalladas debido a que la modelización de la dispersión exige una información espacial y temporal más detallada. El diseño del inventario de emisiones debe tener esto en cuenta para que no se limite su uso futuro.
- b) **Perímetro del sistema.** El perímetro del sistema define el área espacial y el área funcional dentro de las cuales se calcularán las emisiones. El área espacial podría ser la cerca perimetral del aeropuerto, una altura designada (por ejemplo, altura de mezcla) o los caminos de acceso al aeropuerto. El área funcional se define normalmente por las fuentes de emisiones relacionadas funcionalmente con las operaciones aeroportuarias, pero que podrían encontrarse fuera del perímetro del aeropuerto (por ejemplo, depósitos de combustible).
- c) **Actualizaciones.** La frecuencia de las actualizaciones del inventario influye en el diseño de éste y de cualquier base de datos o tabla de datos aplicada (por ejemplo, un valor anual en función de muchos valores a lo largo del año determina la resolución temporal necesaria). Es también importante evaluar las actividades necesarias y disponibles para compilar el inventario con una frecuencia determinada.
- d) **Nivel de exactitud/complejidad.** El nivel de exactitud necesario de los datos de entrada está determinado por la fidelidad requerida para el análisis y por el nivel de conocimientos del analista. Estas orientaciones se concibieron como marco para la realización de análisis a diversos niveles de complejidad. Siempre que sea posible, se proporciona orientación para tres niveles de complejidad diferentes:
  - 1) enfoque simple;
  - 2) enfoque avanzado; y
  - 3) enfoque sofisticado.

3.2.2 Como se muestra en la Tabla 3-1, un inventario de emisiones puede realizarse con diversos niveles de complejidad, dependiendo de la fidelidad requerida de los resultados, así como de la disponibilidad del conocimiento, datos y otros recursos de apoyo. Este texto de orientación pretende ser un marco para realizar estudios a diversos niveles de complejidad. Siempre que sea posible, se proporciona orientación para tres distintos niveles de complejidad (por ejemplo, simple, avanzado y sofisticado). Al realizar un análisis, también debería establecerse el enfoque aplicado.

**Tabla 3-1. Inventario de emisiones realizado a tres niveles de complejidad**

Características	Enfoque simple	Enfoque avanzado	Enfoque sofisticado
Complejidad	Se requieren conocimientos básicos; los datos necesarios son simples, normalizados y disponibles; metodología directa.	Se requieren conocimientos avanzados, específicos del aeropuerto o acceso a fuentes de datos adicionales.	Podrían requerirse conocimientos profundos, cooperación entre diversas entidades o acceso a datos reservados.
Exactitud	En general conservadora	Buena	Muy elevada
Confianza	Baja	Mediana	Elevada

3.2.3 A menos que se requiera otra cosa por razones jurídicas específicas o cumplimiento normativo, se recomienda utilizar los mejores datos disponibles para crear inventarios de emisiones considerando el nivel de exactitud y confianza requerido. Esto podría evolucionar hacia la aplicación de enfoques avanzados o sofisticados más bien que a un enfoque simple. Los enfoques también pueden combinarse utilizando un enfoque para una fuente de emisiones y un enfoque diferente para otra fuente de emisiones al recopilar el inventario. Además, podrían utilizarse combinaciones de enfoques para la misma fuente de emisiones cuando se necesiten varios parámetros para calcular la masa de emisiones.

### 3.3 ESPECIES DE EMISIONES

3.3.1 Existe una amplia gama de contaminantes del aire presentes como emisiones gaseosas y de partículas procedentes de actividades relacionadas con la aviación que pueden tener consecuencias para la salud humana y el medio ambiente. No obstante, no todas ellas son pertinentes o necesarias para los inventarios de emisiones. Deberían consultarse los requisitos estatales para determinar las especies de emisiones que se necesitan realmente para el inventario. En general, podrían considerarse las siguientes especies comunes como especies primarias en los inventarios de emisiones:

- a) óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), incluyendo dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y óxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ );
- b) compuestos orgánicos volátiles (VOC), incluyendo hidrocarburos distintos del metano (NMHC);
- c) monóxido de carbono (CO);
- d) materia particulada no volátil en masa (nvPMmass), que corresponde principalmente a masa de carbono negro;
- e)  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  en masa, donde la suma de la masa de materia particulada volátil más la no volátil se utiliza como valor representativo de la  $\text{PM}_{2.5}$  y la  $\text{PM}_{10}$ <sup>1</sup>;
- f) materia particulada no volátil en número (nvPMnumber), que corresponde principalmente a número de partículas de carbono negro; y
- g) óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ).

3.3.2 El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a veces se incluye en los inventarios (utilizando el consumo total de combustible como base para el cálculo). Se ha de reconocer que el  $\text{CO}_2$  es de interés mundial más que estrictamente local, pero los inventarios locales de  $\text{CO}_2$  pueden alimentar los inventarios mundiales cuando sea necesario.

3.3.3 También puede ser necesario considerar en los inventarios de emisiones especies de emisiones adicionales de posible interés sanitario y ambiental, incluyendo los denominados contaminantes peligrosos del aire (HAP). Bajos niveles de HAP también están presentes en los escapes de las aeronaves y GSE tanto en forma gaseosa como de partículas. La investigación sobre HAP se encuentra en las primeras etapas y cabe señalar que por consiguiente el conocimiento de los factores de emisión es muy limitado para muchas de estas especies. Por lo tanto, la creación de un inventario de HAP puede no ser posible o no puede esperarse que un inventario de ese tipo tenga el mismo nivel de fidelidad que el de otras especies más comunes. En esos casos, las autoridades adecuadas deberían proporcionar mayor orientación. Los siguientes son ejemplos de HAP identificados como representativos de las fuentes aeroportuarias de emisiones al aire, entre otros:

- a) 1,3-butadieno;

---

1. Las partículas de los escapes de motores de aeronaves tienen un diámetro mucho menor a 2,5 micrómetros. Por eso, las  $\text{PM}_{2.5}$  de los escapes equivalen a  $\text{PM}_{10}$ .

- b) acetaldehído;
- c) acroleína;
- d) benceno;
- e) materia particulada de origen diésel;
- f) formaldehído;
- g) plomo (esto corresponde al combustible con plomo, Por ejemplo, avgas, que se utiliza sólo en unos pocos tipos de aeronaves pequeñas);
- h) naftaleno;
- i) propionaldehído;
- j) tolueno; y
- k) xileno.

### 3.4 FUENTES DE EMISIONES RELACIONADAS CON EL AEROPUERTO

3.4.1 En los aeropuertos puede encontrarse una amplia gama y cantidad de fuentes de emisiones. No obstante, dependiendo de las actividades específicas de cada aeropuerto, no todos los tipos de fuentes de emisión están presentes realmente (por ejemplo, algunos están emplazados fuera del aeropuerto). Para representar mejor esta variación, las fuentes de emisiones se han agrupado en cuatro categorías:

- a) emisiones de las aeronaves;
- b) emisiones de los servicios a las aeronaves;
- c) fuentes relacionadas con la infraestructura o fijas; y
- d) fuentes del tránsito vehicular.

3.4.2 Las categorías de las fuentes de emisiones de las aeronaves están normalmente integradas por las siguientes:<sup>2</sup>

- a) **Motor principal de la aeronave.** Los motores principales de las aeronaves con un perímetro de operación específico (desde el arranque al apagado).
- b) **Grupos auxiliares de energía (APU).** Los APU emplazados a bordo de las aeronaves que proporcionan electricidad y aire acondicionado durante los períodos en tierra y aire de sangrado para el arranque del motor principal.

---

2. Se han identificado otras posibles fuentes de emisiones pertinentes pero que no se abarcan en este texto de orientación y son objeto de ulterior investigación.

3.4.3 Las fuentes de emisiones de los servicios a las aeronaves son normalmente las siguientes:

- a) **Equipo auxiliar de tierra (GSE).** GSE necesario para prestar servicios a las aeronaves durante su permanencia en el puesto de estacionamiento: grupo electrógeno de tierra, unidades de climatización, remolques de aeronaves, cintas transportadoras, escalerillas para pasajeros, elevadores de horquilla, tractores, cargadores, etc.
- b) **Tránsito de la parte aeronáutica.** Tránsito de vehículos de servicio y maquinaria [barredoras, camiones (servicios de a bordo, combustible, sanitarios), automóviles, camionetas, autobuses, etc.] dentro de la cerca perimetral del aeropuerto (normalmente un área restringida) que circulan por las vías de servicio.
- c) **Reabastecimiento de combustible a las aeronaves.** Evaporación de los tanques de combustible de la aeronave (respiraderos) y de los camiones de combustible o sistemas de cañerías durante las operaciones de reabastecimiento.
- d) **Deshielo de aeronaves.** Aplicación de sustancias de deshielo y antihielo a las aeronaves durante operaciones invernales.

3.4.4 Las categorías de emisiones procedentes de fuentes estacionarias o relacionadas con la infraestructura comprenden las siguientes:

- a) **Planta generadora de electricidad o calor.** Instalaciones que producen energía para la infraestructura aeroportuaria: calderas, plantas de calefacción/refrigeración, cogeneradores.
- b) **Grupo electrógeno de emergencia.** Generadores diésel para operaciones de emergencia (por ejemplo, para edificios o para luces de pista).
- c) **Mantenimiento de las aeronaves.** Todas las actividades e instalaciones para el mantenimiento de aeronaves, es decir, lavado, limpieza, pintura, bancos de prueba de motores.
- d) **Mantenimiento del aeropuerto.** Todas las actividades para el mantenimiento de las instalaciones aeroportuarias (agentes de limpieza, mantenimiento de edificios, reparaciones, paisajismo) y maquinaria (mantenimiento de vehículos, taller de pintura).
- e) **Combustible.** Almacenamiento, distribución y manipulación del combustible en los depósitos de combustible y estaciones de combustible para vehículos.
- f) **Actividades de construcción.** Todas las actividades de construcción relacionadas con el funcionamiento y desarrollo del aeropuerto.
- g) **Instrucción de bomberos.** Actividades para la instrucción de bomberos con diferentes tipos de combustible (keroseno, butano, propano, madera).
- h) **Deshielo de la superficie.** Emisiones de sustancia de deshielo y antihielo aplicadas a las áreas de movimiento de las aeronaves y a las vías de servicio y de acceso.

3.4.5 Las fuentes de emisiones del tránsito de la parte pública comprenden las siguientes:<sup>3</sup>

- a) **Tránsito vehicular.** Motocicletas, automóviles, camionetas, camiones autobuses y ómnibus relacionados con el aeropuerto en las vías de acceso, aceras, entradas para vehículos, o estacionamiento dentro o fuera del lugar (incluyendo las emisiones de apagado, arranque de motores y evaporación de los tanques de combustible).

---

3. Las fuentes de la parte pública pueden también comprender los trenes, que actualmente no corresponden al alcance de este texto de orientación.



3.4.6 Se considera la masa de emisiones de cada una de estas categorías de fuentes (en la medida pertinente al estudio) y se suman los totales para constituir el inventario de emisiones de todo el aeropuerto.

### 3.5 EMISIONES LOCALES Y REGIONALES

Al crear los inventarios de emisiones del aeropuerto es importante señalar que un aeropuerto siempre es parte de un entorno más amplio que va más allá de la cerca perimetral y de la línea de propiedad del aeródromo. Para ciertos fines, como la modelización de la formación de O<sub>3</sub>, pueden elaborarse inventarios de emisiones en un perímetro regional mayor (por ejemplo, una cuenca atmosférica). Los órganos gubernamentales pertinentes (por ejemplo, autoridades locales, regionales o nacionales) deberían llevar a cabo estos inventarios mayores, normalmente en cooperación con el aeropuerto. En particular, deben definirse los límites del sistema para evitar la doble contabilización de emisiones. Dependiendo de las hipótesis escogidas (por ejemplo, las fuentes consideradas y su extensión espacial o límites de área) el inventario del aeropuerto en sí puede contribuir sólo a un porcentaje relativamente pequeño del inventario de emisiones totales en el área. No obstante, el inventario por sí solo no proporciona necesariamente una indicación del impacto completo de una fuente de emisiones. En algunos casos, se utilizan modelos de dispersión para definir mejor el impacto sobre la calidad del aire.

### 3.6 GARANTÍA DE CALIDAD

3.6.1 Dependiendo de la situación local, la elaboración de un inventario de emisiones puede ser una tarea compleja que podría conducir a algunas simplificaciones o limitaciones. Para lograr resultados fiables en general, los inventarios de emisiones deberían atravesar un proceso de control de calidad durante y después de su elaboración. Como se ve en el análisis siguiente, este control de calidad comprende, entre otras cosas, el análisis de la información ausente, el uso de hipótesis, estimaciones de errores, transparencia y trazabilidad de las fuentes de datos y metodologías, así como validación de los resultados.

3.6.2 **Información ausente.** Debido a la falta de disponibilidad de algunos datos (es decir datos operacionales o factores de emisión precisos), puede haber información o datos ausentes. En estos casos, deberían efectuarse estimaciones o plantearse hipótesis antes de las omisiones, debido a que los inventarios o metodología pueden mejorarse una vez disponibles los datos o la información. En general es más difícil justificar la adición de fuentes que no se han considerado anteriormente.

3.6.3 **Estimación de errores.** Por motivos de credibilidad y para evaluar la exactitud de un inventario, las estimaciones de errores son una parte importante de la elaboración del mismo. Los datos y la información disponibles normalmente tienen uno de tres niveles de calidad, como se indica en lo siguiente:

- a) **Medidos.** Datos realmente medidos con o sin herramientas y métodos calibrados y verificados, contados o de otra manera evaluados por otros medios directamente relacionados con la fuente de datos. Esto también puede comprender el cálculo de un valor medido con un factor de relación (es decir tomar el flujo de combustible realmente medido y utilizar un factor de relación de CO<sub>2</sub> de, por ejemplo, 3 150 gramos por kg de combustible para determinar la masa de CO<sub>2</sub> emitida por los motores que consumen keroseno).
- b) **Calculados.** Los datos se calculan aplicando algoritmos disponibles y datos no directamente relacionados con la fuente de datos.
- c) **Estimados.** Los datos se estiman utilizando información de referencia, experiencias anteriores o hipótesis cualificadas.

3.6.4 Para cada nivel de calidad de datos, puede definirse previamente una barra de error (valor  $\pm$  desviación absoluta) o porcentaje de error (valor  $\pm$  porcentaje) y calcularse el error total. Si se aplica a todas las fuentes, puede determinarse fácilmente dónde es apropiado mejorar la calidad de los datos o dónde pueden aceptarse niveles mayores de incertidumbre sin detrimento significativo para el resultado general.

3.6.5 **Transparencia y trazabilidad.** Para hacer posible un eficaz control de la calidad y prevenir la duplicación posible de cálculos del inventario de emisiones con datos mejorados, debe delinearse y documentarse adecuadamente la metodología de cálculo aplicada. Las fuentes de información y los factores de emisión utilizados en los inventarios deben identificarse y referenciarse. Cuando una fuente de datos ideal identificada pueda no ser una opción viable, entonces deberán especificarse otras fuentes de datos (por ejemplo, la segunda mejor).

3.6.6 **Validación.** Los resultados finales deberían validarse y verificarse por un sistema adecuado de control de calidad. Esto puede comprender la comparación con datos de referencia de sistemas similares o un nuevo cálculo de elementos específicos del inventario de emisiones con diferentes herramientas.

### 3.7 PRONOSTICACIÓN

Al realizar un análisis de la calidad del aire para las condiciones pasadas y presentes, los analistas podrían considerar la contribución de futuras fuentes de emisiones aeroportuarias. Al preparar un inventario de emisiones aeroportuarias que representen futuros escenarios (por ejemplo, 5, 10 ó 25 años en el futuro), debería emplearse una metodología que abarque todos los elementos del aeropuerto, incluyendo las operaciones y movimientos de aeronaves, tramitación de pasajeros y carga, necesidades de la infraestructura aeroportuaria y volúmenes de tránsito de los vehículos de superficie. Las metodologías de pronóstico se han transformado en emprendimientos muy complejos y a menudo exigen muchas hipótesis o conocimientos avanzados del aeropuerto y su entorno, comportamientos del mercado, utilización del equipo de las líneas aéreas, y disposiciones normativas. La descripción de las metodologías de pronóstico detalladas está en general fuera del alcance de esta orientación para inventarios de emisiones.

-----



## Apéndice 1 del Capítulo 3

# METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE LOS MOTORES DE LAS AERONAVES

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Los motores principales de las aeronaves pueden, en ocasiones, recibir la mayor parte de la atención de las partes interesadas en las emisiones aeronáuticas debido a que pueden ser la fuente dominante relacionada con el aeropuerto. En este apéndice se recomiendan metodologías para la estimación de las emisiones de los motores de las aeronaves. Los motores principales son los utilizados para propulsar la aeronave hacia delante. Otros motores de a bordo comprenden los APU, que proporcionan energía eléctrica y aire de sangrado neumático cuando la aeronave se encuentra en rodaje o estacionada en la puerta y no se dispone de otra alternativa. La purga de combustible de los tanques de combustible de las aeronaves no está permitida y, por lo tanto, no se considera como fuente de emisiones.

1.2 Los motores principales se clasifican normalmente como motores turbofan de turbina de gas (a veces denominados turborreactores) y motores turbohélice abastecidos con keroseno aeronáutico (también conocido como combustible de reactores) o motores de pistón de combustión interna alimentados con gasolina aeronáutica.

#### Emisiones de los motores principales en las cercanías de los aeropuertos

1.3 Las emisiones procedentes de una combinación de motor principal y aeronave son principalmente una función de tres parámetros: tiempo en el modo (TIM), índices de emisión del motor principal (EI) y flujo de combustible del motor principal. Las emisiones totales de una flota que presta servicios a un aeropuerto pueden incluir también dos parámetros adicionales, tamaño/tipo de la flota y número de operaciones. En el cálculo de las emisiones de las aeronaves en un determinado aeropuerto, la exactitud deseada del inventario de emisiones dictará los valores y la metodología utilizados (por ejemplo, enfoque simple, avanzado o sofisticado) para determinar cada uno de esos parámetros. Si bien en este documento se trata de simplificar el análisis del inventario en tres enfoques, se conviene en general en que el usuario puede a veces utilizar un enfoque híbrido, combinando elementos de los enfoques simple, avanzado y sofisticado. No obstante, debe tenerse cuidado de no aplicar un enfoque híbrido donde todos los aspectos estén sobreestimados, asignando inadvertidamente una carga más elevada a las emisiones de las aeronaves al evaluar los inventarios aeroportuarios. En consecuencia, se recomienda que el analista documente completamente la metodología del análisis incluyendo la forma en que se utiliza este texto de orientación. Esto se analiza con más detalle en la Sección 4. La siguiente información proporciona descripciones básicas de cada uno de estos parámetros:

- a) **Tiempo en el modo (TIM)** es el periodo de tiempo, normalmente medido en minutos, que los motores de las aeronaves insumen realmente a un reglaje de potencia identificado, normalmente correspondiente a uno de los modos de operación del LTO del ciclo de vuelo operacional.
- b) **Índice de emisión (EI) y flujo de combustible.** El índice de emisión (EI) se define como la masa de contaminante emitida por unidad de masa de combustible consumido para un determinado motor. El Banco de datos sobre emisiones de motores (EEDB) de la OACI proporciona el EI para motores certificados en gramos de contaminante por kilogramo de combustible (g/kg) para el NO<sub>x</sub>, CO y HC, así como el flujo de combustible específico del modo en unidades de kilogramo por segundo (kg/s), para los cuatro reglajes de potencia del plan de certificación de emisiones de motores. Multiplicando el EI

específico del modo por el flujo de combustible específico del modo, se obtiene un régimen de emisión específico del modo expresado en unidades de gramos por segundo. Si se multiplica ese régimen de emisión por el TIM (en unidades por segundo), se obtiene la emisión específica del modo en unidades de gramos. Para inventarios más exactos, es necesario introducir ajustes a estos valores para tener en cuenta diferentes reglajes de potencia, efectos de instalación, etc. Se dispone de información adicional sobre la nvPM medida en gramos por kilogramo de combustible (g/kg) para la masa y en número de partículas por kilogramo de combustible (número/kg) para la concentración en número.

## 2. CERTIFICACIÓN RESPECTO DE LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DE LAS AERONAVES

2.1 Para fines de certificación respecto a las emisiones, la OACI ha definido un ciclo LTO de referencia específico por debajo de una altura de 914 m (3 000 ft) AGL,<sup>1</sup> conjuntamente con su ensayo de certificación internacionalmente convenido, sus procedimientos de medición y sus límites (véase el Anexo 16, Volumen II, para más información).

2.2 El ciclo consta de cuatro fases modales escogidas para representar la aproximación, el rodaje/marcha lenta, despegue y ascenso y es una versión simplificada del ciclo de vuelo operacional (véase la Tabla 3-A1-1). Un ejemplo de esta simplificación es que supone que la operación a potencia de despegue cambia abruptamente a potencia de ascenso al final del recorrido de despegue y que se mantiene sin cambios hasta los 3 000 ft. Aunque no tiene en cuenta los detalles y las variaciones que ocurren en las operaciones reales, el ciclo LTO para certificación respecto a las emisiones se diseñó como ciclo de referencia para fines de comparación de tecnologías y se ha reafirmado reiteradamente como adecuado y apropiado para estos efectos.

**Tabla 3-A1-1. Ciclo LTO de emisiones de referencia**

Fase de operación	Tiempo en el modo (minutos)		Reglaje de empuje (porcentaje del empuje nominal)
Aproximación	4,0		30
Rodaje y marcha lenta en tierra	26	7,0 (entrada) 19,0 (salida)	7
Despegue	0,7		100
Ascenso	2,2		85

1. En un estudio de inventario de emisiones, se considera que la altura de 3 000 ft por encima del nivel del terreno es la elevación del punto de referencia de aeródromo escogido en el estudio.

2.3 El ciclo LTO de emisiones de referencia tiene por objeto tratar las operaciones de las aeronaves por debajo de la altura de mezcla atmosférica o capa de inversión. Si bien la altura de mezcla real puede variar de lugar en lugar, en promedio se extiende hasta una altura de aproximadamente 914 m (3 000 ft), que es la altura utilizada para obtener el TIM en vuelo. Los contaminantes emitidos por debajo de la altura de mezcla pueden tener efectos en las concentraciones con respecto a la calidad del aire local, donde los contaminantes emitidos más cerca del terreno tienen posiblemente mayores efectos en las concentraciones a nivel de éste.<sup>2</sup>

2.4 Las características del ciclo LTO para certificación seleccionadas se obtuvieron de encuestas realizadas en los años 1970. Reflejaban operaciones con tránsito máximo (es decir condiciones adversas típicas) más bien que operaciones LTO promedio. La justificación para utilizar estas características para las normas sobre emisiones de aeronaves se basó mayormente en la protección de la calidad del aire dentro y alrededor de grandes terminales aéreas metropolitanas durante condiciones de mucho tránsito o condiciones meteorológicas adversas.

2.5 Se ha reconocido que, incluso para aeronaves del mismo tipo, hay grandes variaciones en los tiempos de operación reales y en los reglajes de potencia entre diferentes aeropuertos internacionales y que, incluso en un mismo aeropuerto, podría haber considerables variaciones día a día o a lo largo de un solo día. No obstante, el uso de un ciclo LTO fijo proporcionó un marco de referencia constante a partir del cual podrían compararse las diferencias de actuación de los motores en cuanto a las emisiones.

2.6 En consecuencia, el ciclo LTO de emisiones de referencia es necesariamente un modelo artificial sujeto a muchas discrepancias cuando se le compara con las condiciones del mundo real en los distintos aeropuertos. Fue diseñado como ciclo de referencia para fines de certificación y demostración de cumplimiento con las normas sobre emisiones en vigor.

2.7 Este ciclo LTO, elaborado para fines de certificación, puede resultar también adecuado para cálculos simples de inventarios de emisiones. No obstante, debido a sus hipótesis genéricas, el uso de este ciclo no reflejaría normalmente las emisiones reales. Si se dispone de datos operacionales más precisos, estos podrían utilizarse en su lugar para lograr un inventario más exacto.

2.8 Como se señala en otras partes de esta orientación, las Normas de la OACI sobre emisiones de los motores de las aeronaves abarcan emisiones de CO, HC, NO<sub>x</sub>, nvPM y humo. Se aplican solamente a los motores turborreactores y turbofan de aeronaves subsónicas y supersónicas con empuje nominal mayor o igual a 26,7 kN (Anexo 16, Volumen II). La OACI excluyó de sus Normas los pequeños motores turbofan y turborreactores (empuje nominal inferior a 26,7 kN), y los motores turbohélice, de pistón y turbomotores de helicóptero, los APU y los motores de las aeronaves de la aviación general sobre la base del número muy grande de modelos, el costo oneroso del cumplimiento y el poco uso de combustible comparado con las aeronaves de reacción comerciales.

---

2. La OACI reconoce que distintos Estados pueden tener distintas normas o umbrales para establecer si un contaminante emitido tiene consecuencias locales. En muchos casos, esto se expresa en términos de una altitud máxima hasta la cual se emite un determinado contaminante. Algunos Estados pueden establecer una altitud específica para esos fines. Otros pueden estipular que se construyan modelos para identificar la altitud a la cual los contaminantes pueden tener consecuencias locales en un área determinada. Esto se conoce a menudo como la "altura de mezcla" dentro de la "capa límite" atmosférica. En términos básicos, la "altura de mezcla" es la altura de la mezcla vertical de la troposfera inferior. También en términos básicos, la "capa límite" es la parte de la troposfera que experimenta diferencia directa de la presencia de la superficie terrestre. Los Estados que especifican que se determine una altura de mezcla para fines de evaluación de la calidad del aire local normalmente han aceptado modelos para dichos análisis o especifican una altura por defecto para la altura de mezcla, como los 3 000 ft.

### Datos para la certificación respecto de las emisiones

2.9 Los ensayos de certificación respecto de las emisiones se realizan en motores no instalados en una dependencia de ensayo estática instrumentada y calibrada. Las emisiones de los motores y las mediciones de la performance se realizan a un gran número de reglajes de potencia (normalmente más de diez) que abarcan la gama completa desde marcha lenta en reposo hasta plena potencia y no sólo los cuatro modos LTO prescritos de la OACI. Los datos medidos se corrigen respecto de condiciones de performance de motores de referencia y condiciones atmosféricas de referencia de ISA a nivel del mar y a una humedad de 0,00634 kg de agua/kg de aire, utilizando procedimientos bien establecidos (véase el Anexo 16, Volumen II, para más información).

2.10 Los datos para la certificación por la OACI respecto de las emisiones de los motores para CO, HC y NO<sub>x</sub>, conjuntamente con los regímenes de flujo de combustible conexos se notifican para un conjunto de cuatro reglajes de potencia de referencia definidos como “despegue”, “ascenso”, “aproximación” y “rodaje/marcha lenta en tierra”, respectivamente y para tiempos prescritos a cada uno de estos reglajes de potencia (es decir “tiempo en el modo”). No obstante, las emisiones de humo sólo deben notificarse como valor máximo de densidad del humo, representado por un índice de humo (SN) para cada motor, independientemente del reglaje de potencia (aunque para la mayoría de los motores certificados ahora se notifican SN específicos del modo).

2.11 Los valores de certificación respecto de las emisiones anteriormente descritos se proporcionan en el EEDB de la OACI, como hojas de datos de cada motor y también como hoja de cálculo que contiene los datos de todos los motores certificados para los cuales los fabricantes han suministrado datos. Este banco de datos está disponible al público en la web mundial en <http://easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank> y se actualiza periódicamente. En el Adjunto A a este apéndice se presenta un ejemplo de hoja de datos de emisiones de motores.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE VUELO OPERACIONAL

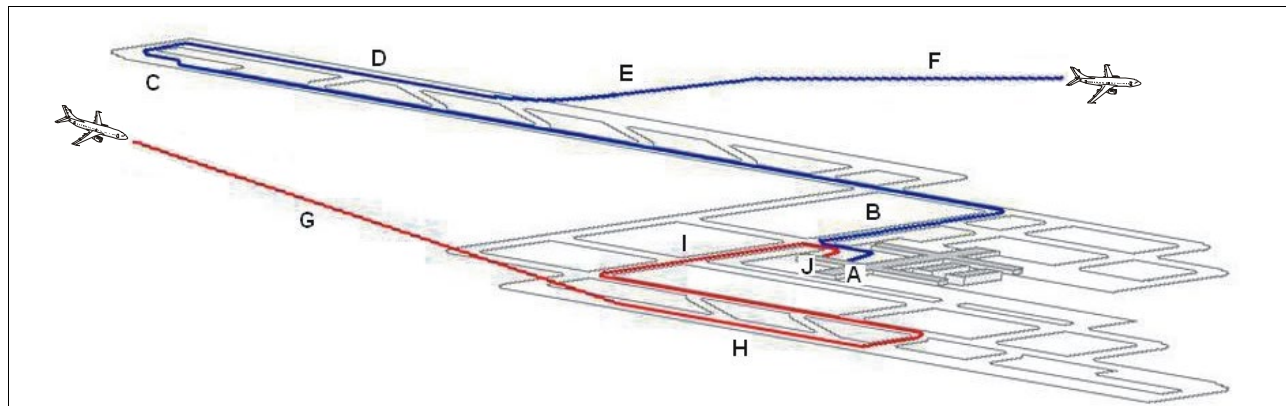
3.1 Las fases de salida y llegada de un ciclo de vuelo operacional real para una aeronave comercial son más complejas que las cuatro fases modales (aproximación, rodaje/marcha lenta, despegue y ascenso) utilizadas para fines de certificación por la OACI. Los ciclos reales emplean varios reglajes de empuje de los motores de las aeronaves y los tiempos en que las aeronaves permanecen a esos reglajes se ven afectados por factores como el tipo de aeronave, el aeropuerto y las características y disposición de las pistas, así como las condiciones meteorológicas locales. No obstante, existen varios segmentos que son comunes a prácticamente todos los ciclos de vuelo operacionales y que se muestran en la Figura 3-A1-1 y se describen en las secciones subsiguientes.

3.2 El funcionamiento del APU, para aeronaves que cuentan con este equipo, se limita normalmente a los períodos en que la aeronave está en rodaje o estacionaria en la terminal. Normalmente, el APU se apaga inmediatamente después del arranque del motor principal y, después del aterrizaje, se vuelve a arrancar en general cuando la aeronave se aproxima al puesto de estacionamiento del área terminal. Si uno o más motores se apagan durante el rodaje, también puede ser necesario arrancar el APU durante éste. En varios aeropuertos se especifican tiempos máximos de funcionamiento del APU, principalmente para limitar el ruido en el área terminal.

3.3 Según figura en el análisis siguiente, la actividad de las aeronaves en un aeropuerto se cuantifica en términos de ciclos LTO o de operaciones. Una operación representa un aterrizaje o un despegue, y dos operaciones pueden igualar a un ciclo LTO (por ejemplo, rodaje hacia la pista, despegue, aterrizaje y rodaje hacia la puerta).

## 4. ENFOQUES PARA EL CÁLCULO DE LAS EMISIONES

4.1 Existen varios enfoques o metodologías para cuantificar las emisiones de las aeronaves, cada uno de ellos con un cierto grado de exactitud y un grado inverso de incertidumbre.



**Figura 3-A1-1. Ciclo de vuelo operacional**

**SALIDA**

- A. **Arranque de los motores.** Es normal arrancar los motores principales antes de la maniobra de empuje, o durante la misma, a partir de la puerta o puesto de estacionamiento de la aeronave. Cuando la aeronave no requiere empuje, los motores principales se arrancan inmediatamente antes del rodaje.
- B. **Rodaje a la pista.** Normalmente, las aeronaves realizan un rodaje con todos los motores encendidos hacia la pista o área de espera antes de ingresar a la pista, aunque pueden hacerlo con un número menor de motores en marcha en ciertas circunstancias. El rodaje se realiza normalmente al reglaje de potencia de marcha lenta/rodaje, aparte de breves ráfagas de potencia para superar la inercia inicial al comienzo del rodaje o, si es necesario, para tomar virajes pronunciados.
- C. **Espera en tierra.** Cuando es necesario, puede pedirse a la aeronave que permanezca en una cola mientras espera autorización para ingresar a la pista y rodar hasta la posición de despegue. Normalmente, los motores principales se colocan a empuje de marcha lenta con breves ráfagas de potencia para avanzar hacia la posición.
- D. **Recorrido de despegue y elevación inicial.** La aeronave acelera a lo largo de la pista a la velocidad de rotación predeterminada al final del recorrido de despegue con los motores principales regulados para potencia de despegue. Los explotadores rara vez utilizan la plena potencia para el despegue; en vez de ello, se establece un reglaje de empuje predeterminado al comienzo del recorrido de despegue. Los explotadores utilizan ya sea empujes de despegue que no son nominales o, más frecuentemente, reglajes de empuje reducido (por ejemplo, flexible), que son determinados por el peso de despegue real de la aeronave, la longitud de pista y los factores meteorológicos del momento. El manejo de los mandos de gases durante el recorrido de despegue se realiza a veces en la primera parte, cuando los mandos se colocan inicialmente en una posición intermedia, y unos pocos segundos después se adelantan al reglaje de potencia de despegue predeterminado.
- E. **Ascenso inicial hasta la reducción de empuje.** Después de dejar la superficie, se pliega el tren de aterrizaje (es decir las ruedas) de la aeronave y ésta asciende a velocidad constante con el reglaje de potencia de despegue inicial hasta que alcanza la altura de reducción de empuje (es decir entre 800 y 1 500 ft AGL) a la que se retardan los mandos.
- F. **Aceleración, paso a configuración limpia y ascenso en ruta.** Después de la reducción de empuje, la aeronave continúa ascendiendo con un reglaje de empuje inferior al utilizado para el despegue, a lo que sigue una retracción de flaps y aletas hipersustentadoras a medida que la aeronave acelera y alcanza la altitud de crucero.

**LLEGADA**

- G. **Aproximación final y extensión de flaps.** La aproximación final estabilizada a partir del punto de referencia de aproximación final (FAF) sigue una pendiente de planeo relativamente predecible a bajos empujes de motor. Los reglajes de empuje se aumentan para contrarrestar la resistencia al avance adicional a medida que se despliegan los flaps y el tren de aterrizaje, mientras la velocidad disminuye hacia el enderezamiento.
- H. **Enderezamiento, toma de contacto y recorrido de aterrizaje.** Normalmente, los mandos se retardan a marcha lenta durante el enderezamiento y el recorrido de aterrizaje. Esto va seguido por la aplicación de los frenos de las ruedas y, cuando corresponda, inversión de empuje para disminuir la velocidad de la aeronave en la pista.
- I. **Rodaje desde la pista al puesto de estacionamiento o puerta.** El rodaje desde la pista es un proceso similar al rodaje hacia la pista que se describió anteriormente; no obstante, los explotadores pueden apagar uno o más motores, según corresponda, durante el rodaje si se da la oportunidad.
- J. **Apagado de los motores.** Los motores restantes se apagan después que la aeronave ha terminado el rodaje y se dispone de energía para los servicios de a bordo de la aeronave.



4.2 En esta sección se abarcan tres enfoques generales para cuantificar las emisiones de los motores de las aeronaves, y cada enfoque presenta diversos niveles de complejidad. Cada enfoque puede incorporar varias opciones para ciertos parámetros y factores contribuyentes, dependiendo de la disponibilidad de los datos y de la información:

- a) El enfoque simple es el menos complicado, requiere una cantidad mínima de datos y proporciona el mayor nivel de incertidumbre lo que resulta a menudo en una sobreestimación de las emisiones de las aeronaves. Utiliza información pública y tablas de datos de muy fácil disponibilidad y requiere una cantidad mínima de información específica del aeropuerto. Es el enfoque más básico presentado en esta orientación para estimar las emisiones de los motores de las aeronaves. Los únicos datos específicos del aeropuerto que se requieren son el número de movimientos de aeronaves (durante un cierto período; por ejemplo, un año) y cada tipo de aeronave involucrado en cada movimiento (opción A) o alguna información básica adicional sobre el motor utilizado para cada tipo de aeronave (opción B).

El enfoque simple debería utilizarse solamente como un medio para realizar una evaluación inicial de las emisiones de los motores de las aeronaves en un aeropuerto. Para especies más contaminantes, el enfoque resulta en general conservador, lo que significa que el resultado sobreestimarán a menudo el nivel total de las emisiones de los motores de las aeronaves. No obstante, para algunas especies de emisiones y aeronaves menos comunes, las emisiones resultantes pueden ser subestimadas. Como tal, no está claro con cuánta exactitud el enfoque simple estima las emisiones reales de motores en un determinado aeropuerto.

- b) El enfoque avanzado refleja un mayor nivel de refinamiento con respecto a los tipos de aeronave, tipos de motor, cálculos de EI y TIM. Este enfoque exige información específica relacionada con el aeropuerto o hipótesis cualificadas que todavía son de dominio público pero que pueden ser más difíciles de obtener. Refleja también las condiciones locales al incorporar algún tipo de cálculo de performance de la aeronave. Estas mejoras resultan en un panorama más exacto de las emisiones del motor principal con respecto al enfoque simple, aunque el valor de las emisiones totales se considera todavía conservador.
- c) El enfoque sofisticado refleja mejor las emisiones reales de los motores de las aeronaves. Es el enfoque más completo, exige un volumen máximo de datos y proporciona los más altos niveles de certidumbre. El enfoque sofisticado va más allá de los datos de certificación de LTO y del TIM y utiliza datos reales de performance operacional de motores y aeronaves. La aplicación de este enfoque exige un mayor conocimiento de las operaciones de aeronaves y motores y, en ciertos casos, requerirá el uso de datos confidenciales o datos o modelos que normalmente no están disponibles al público. En la mayoría de los casos, exige que los usuarios realicen análisis de alto nivel.

4.3 Las metodologías alternativas permiten lograr un grado de exactitud gradualmente mayor y un grado de incertidumbre inverso. La finalidad y necesidad de cuantificar las emisiones de las aeronaves imponen el nivel de exactitud necesario en un inventario, lo que a su vez determina la metodología apropiada. El factor secundario es la disponibilidad de datos. Aunque un análisis puede justificar un alto grado de exactitud, ello puede no ser posible para ciertos elementos del análisis debido a la falta de datos disponibles. La OACI insta a que, si un inventario de emisiones entraña políticas que afecten las operaciones de las aeronaves en un aeropuerto en particular, los cálculos se basen en los mejores datos disponibles y que normalmente no se utilice el enfoque simple. Cuando se dispone de más información sobre las operaciones de aeronaves en un aeropuerto, entonces es más apropiado aplicar un enfoque más avanzado.

4.4 También es importante destacar que, aunque en su nivel más simple puede ser posible que los individuos construyan inventarios de emisiones, los métodos avanzados y sofisticados probablemente necesiten cierta forma de colaboración con otros recursos aeronáuticos. Por ejemplo, la identidad de los tipos reales de aeronave y motor, TIM realistas y exactos y los reglajes reales de potencia de motor utilizados en el análisis exigen datos que a menudo son difíciles de obtener. En general, cuanto más sofisticado es el método, mayor es el nivel de colaboración que se necesitará.

4.5 La OACI subraya la importancia de que los aeropuertos y Estados utilicen los mejores datos disponibles cuando construyan un inventario de emisiones de motores de aeronaves. Las metodologías de la OACI para inventarios de emisiones aumentan en exactitud, pasando del enfoque simple al avanzado y, en última instancia, al sofisticado. La OACI recomienda seleccionar un enfoque o partes del mismo para reflejar la fidelidad deseada o requerida de los resultados. El analista de la calidad del aire puede referirse a estos enfoques como el enfoque simple, el enfoque avanzado y el enfoque sofisticado de la OACI. También cabe señalar que los métodos pueden combinarse y que el simple hecho de que se utilice un enfoque simple para una parte del inventario no impide utilizar enfoques más precisos para las partes restantes del mismo.

4.6 En la Tabla 3-A1-2 se proporciona una reseña de los enfoques de cálculo. En ella figura cada uno de los cuatro parámetros principales (mezcla de la flota, movimientos, TIM y EI) junto con otros factores contribuyentes. También se incluyen explicaciones sobre la forma en que se determinan estos parámetros aplicando los tres enfoques (simple, avanzado y sofisticado).

4.7 Al escoger un enfoque para crear un inventario de emisiones de aeronaves, puede seleccionarse una mezcla de los diversos enfoques y opciones. La elección se basa en la disponibilidad de datos e información, así como en la exactitud requerida del inventario. Los diversos elementos enumerados y descritos en la Tabla 3-A1-2 son en cierta medida independientes entre sí; por ejemplo, no todos los elementos de "opción B" deben ir juntos necesariamente.

4.8 Por motivos lógicos y de coherencia, los elementos "Flota" y "Movimientos" de cada enfoque se han agrupado. El enfoque simple, opción A, tampoco puede mezclarse con otras opciones o enfoques; lo mismo es cierto para el enfoque sofisticado. Los otros elementos (enfoque simple, opción B, y opciones A y B) pueden mezclarse.

4.9 Como prelude a los detalles involucrados en cada enfoque, la OACI desea establecer el concepto general dentro de cada método. En resumen, el inventario comienza con una combinación de aeronave y motor individuales y en general aplica los parámetros operacionales y de emisiones en un proceso de dos etapas, como sigue:

- a) **Etapa uno.** Cálculo de las emisiones para una combinación única de aeronave/motor sumando las emisiones de todos los modos de operación que constituyen un ciclo LTO, donde las emisiones de un modo único pueden expresarse como:
  - 1) Emisiones modales para una combinación aeronave/motor = TIM x combustible utilizado (a la potencia apropiada) x EI (a la potencia apropiada) x número de motores.
  - 2) Las emisiones para el ciclo de vuelo operacional LTO único son entonces una suma de las partes individuales del ciclo. El método más sofisticado, los datos de EI y flujo de combustible pueden no ser constantes a través de todo el TIM.
- b) **Etapa dos.** Cálculo de las emisiones totales mediante sumatoria sobre toda la gama de combinaciones aeronave/motor y número de ciclos LTO para el período requerido.

## 5. FLOTA Y MOVIMIENTOS DE AERONAVES

5.1 Una flota de aeronaves es una descripción genérica de las diversas combinaciones de aeronaves y motores que prestan servicio a un aeropuerto. En su forma más sencilla, la flota de aeronaves puede caracterizarse en general según descriptores tales como, por ejemplo, pesada, grande, pequeña, turbohélice y de pistón. No obstante, para fines de creación de inventarios de emisiones de aeronaves, normalmente es necesario identificar las flotas con más precisión (por ejemplo, por tipo de aeronave).

Tabla 3-A1-2. Reseña de los enfoques para el cálculo

Parámetros clave	Enfoque simple		Enfoque avanzado		Enfoque sofisticado
Flota (combinaciones de aeronave y motor)	Identificación de tipos de grupo de aeronave (por ejemplo, todos B737 o todos A319/320/321)		Identificación de aeronaves y tipos representativos de motores (por ejemplo, todos A320 con 50% V52527 y 50% CFM56-5B4/3)		Combinaciones reales de tipo/subtipo de aeronave y motor [por número de cola y (UID) de motor o similar]
Movimientos	Número de movimientos de aeronave por tipo de aeronave (según una tabla de consulta), como se define en "Flota"		Número de movimientos de aeronave por combinación de aeronave y motor según se define en "Flota"		Número de movimientos de aeronave por número de cola de aeronave
Cálculo de emisiones	Opción A Tabla de consulta de la CMNUCC (sin cálculo)	Opción B Hoja de cálculo	Cálculo basado en la performance, posiblemente reflejando parámetros adicionales como velocidad hacia delante, altitud, condiciones ambientales (depende de modelos)		Basado en la performance con datos reales sobre motores (P3/T3) e incluyendo condiciones ambientales
Niveles de empuje	Opción A N/A	Opción B Empuje nominal	Opción A Empuje nominal reducido promedio de aeropuerto o específico del grupo de aeronaves	Opción B Empuje nominal reducido calculado en el modelo de performance	Empuje real proporcionado por el transportista
TIM		Opción B LTO de certificación de la OACI	Opción A Tiempos en el modo modificados (promedio específico del aeropuerto o reales para uno o varios modos)	Opción B TIM calculado por modelo de performance	Valores reales para todos los modos basados en los movimientos
Flujo de combustible		Opción B Valores del banco de datos de la OACI para certificación	Opción A Obtenidos del EEDB de la OACI con un modelo de conversión de empuje a flujo de combustible	Opción B Obtenido del EEDB de la OACI con un modelo de performance	Valores refinados utilizando datos reales de performance y operacionales obtenidos del transportista
EI	Opción A Masa de emisiones de LTO de la CMNUCC por tipo de aeronave	Opción B Valores del banco de datos de la OACI para certificación	Opción A Obtenidos del EEDB de la OACI y nivel de empuje mediante el método de curvas de BFFM2	Opción B Obtenido del EEDB de la OACI mediante el método de curvas de BFFM2	Valores refinados utilizando datos reales de performance y operacionales obtenidos del transportista
Emisiones al arranque	No se considera		Se considera incluir — véanse los párrafos 6.53 a 6.59		Se considera incluir — véanse los párrafos 6.53 a 6.59
Deterioro de motores	No se considera — véanse los párrafos 6.44 a 6.52		No se considera — véanse los párrafos 6.44 a 6.52		No se considera — véanse los párrafos 6.44 a 6.52

5.2 Las aeronaves pueden clasificarse en general según el fabricante y el modelo. Por ejemplo, “A320” es un Airbus modelo 320 o “B737” representa al Boeing 737, aunque cabe señalar que un tipo de aeronave genérico puede contener variaciones importantes en cuanto a tecnología de los motores y características de emisiones muy diferentes entre los distintos tipos y sus motores instalados.

5.3 Una clasificación más descriptiva para un tipo de aeronave incluiría también el número de serie de cada modelo, como por ejemplo el B747-400 para aeronaves Boeing 747 de la serie 400. Esto contribuye a establecer el tamaño del motor de la aeronave y la tecnología utilizada en el mismo y resulta necesario para la construcción de un inventario de emisiones más exacto. No obstante, incluso dentro de una misma clase, como la de B744, los distintos explotadores aéreos pueden tener diferentes tipos de motor, por sus propias razones.

5.4 Finalmente, la representación más exacta de la aeronave es identificar el modelo y serie de la misma conjuntamente con los motores reales que equipan la aeronave y las modificaciones que afectan su performance de emisión (por ejemplo, B777-200IGW con motores GE90-85B con combustores DAC II). Dado que la propia aeronave no produce emisiones, contar con información detallada sobre los motores instalados en la flota es un factor fundamental para la construcción de un inventario de emisiones exacto.

### Flota de aeronaves-enfoque simple

5.5 Para el enfoque simple, los dos elementos principales de la flota de aeronaves (por ejemplo, tipos de aeronave y de motor) se han simplificado en una lista de los tipos de aeronaves para los cuales se proporcionan datos sobre emisiones calculados con anterioridad. Para cada aeronave, se ha supuesto que el tipo de motor es el tipo más común en funcionamiento a nivel internacional para ese tipo de aeronave,<sup>3</sup> y las emisiones de dicho tipo de motor se reflejan en los correspondientes factores de emisión. En la Tabla B-1 del Adjunto B a este apéndice figura una lista de 63 aeronaves y se proporcionan datos de emisiones para cada uno de sus tipos de motor.<sup>4</sup>

5.6 Si la flota que presta servicios al aeropuerto comprende aeronaves que no figuran en la Tabla B-1, entonces debería utilizarse la Tabla B-3 para determinar una aeronave genérica apropiada. Véase la columna encabezada con “aeronaves de IATA en el grupo” para ubicar el tipo de aeronave mostrado en la columna encabezada con “tipo de aeronave genérico”.

5.7 Si una aeronave no figura en la Tabla B-1 ni en la B-3, entonces se recomienda utilizar información suplementaria como el peso, número de motores, categoría de tamaño y autonomía para identificar una aeronave equivalente adecuada que figure en esas tablas, reconociendo que esto introducirá hipótesis adicionales que pueden afectar la exactitud de los resultados. En el caso de un aeropuerto con servicio principal de reactores regionales, reactores de negocios o turbohélices, es improbable que la gama de aeronaves produzca un resultado fiable. En estos casos, se recomienda un método más avanzado.

---

3. Al 30 de julio de 2004, los datos sobre emisiones del B747-300 se basan en emisiones proporcionales para los dos tipos de motor más comunes.

4. Inicialmente, el CAEP elaboró estos datos a pedido de la CMNUCC en relación con las directrices de la Convención para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, que se utilizan para cuestiones de emisiones globales más que para la calidad del aire local. Por consiguiente, comprende datos sobre emisiones de gases de efecto invernadero que no son pertinentes para la calidad del aire local. Estos pueden omitirse para los inventarios creados para evaluar la calidad del aire local (aunque en algunos lugares quizás convenga construir inventarios de emisiones de CO<sub>2</sub> para otros fines). Dado que el interés principal de la CMNUCC era las emisiones de gases de efecto invernadero de todo el transcurso del vuelo, los datos sobre emisiones de LTO se basan en las Normas de certificación de la OACI y, por consiguiente, no reflejarán con exactitud las emisiones reales en un entorno operacional. En la mayoría de los casos, el uso de los refinamientos analizados respecto de los enfoques avanzado y sofisticado contribuirá a lograr un inventario más exacto para los contaminantes pertinentes.

### Movimientos de aeronaves-enfoque simple

5.8 Para el enfoque simple, es necesario conocer (o contar con una estimación) el número de movimientos de aeronave u operaciones (por ejemplo, LTO) y tipo de aeronaves en el aeropuerto durante un período determinado (por ejemplo, hora, día, mes o año).

5.9 La mayoría de los aeropuertos imponen derechos de usuario para el suministro de instalaciones y servicios, normalmente recaudados como derechos de aterrizaje. En estos casos, los explotadores aeroportuarios cuentan con registros exactos de los movimientos de aterrizaje, incluyendo el número de aterrizajes y el tipo de aeronave correspondiente. Algunos aeropuertos también registran el número de despegues, aunque los registros de aterrizaje normalmente proporcionan datos más fiables. Por este motivo, en los grandes aeropuertos, se dispone a menudo de datos publicados sobre los movimientos anuales de aeronaves.

5.10 El ciclo LTO contiene un aterrizaje y un despegue, de modo que el número de aterrizajes y despegues en un aeropuerto debería ser igual. El número total de aterrizajes o despegues puede tratarse como el número de LTO. Cualquier diferencia en el número de aterrizajes y el número de despegues indicará normalmente un error en los registros; si no hay explicación para esta discrepancia, entonces debería utilizarse el número mayor.

5.11 Si no se dispone de datos, será necesario realizar un estudio del número de movimientos de aeronaves y de los tipos de aeronaves a lo largo de un período (a corto o mediano plazo) observando que, en la mayoría de los aeropuertos, existen normalmente diferencias estacionales en el número de movimientos.

### Flota de aeronave-enfoque avanzado

5.12 Al igual que el enfoque simple, la primera etapa del enfoque avanzado consiste en cuantificar las operaciones de aeronaves o LTO por tipo de aeronave específico del aeropuerto. Normalmente, esta información puede obtenerse directamente a partir de los registros del aeropuerto, que reflejan la forma más exacta de esta información. No obstante, debido a que ninguna base de datos es totalmente exacta y que los cambios de equipamiento de motores en las aeronaves, mezclas internas temporarias y otras consideraciones pueden introducir inexactitudes con el tiempo, resulta importante recoger tanta información cercana a la fuente de la operación como sea posible. Si el acceso a esta información no es posible, entonces pueden consultarse estadísticas nacionales de tránsito si están disponibles. Las fuentes de datos adicionales comprenden los proveedores de servicios de navegación aérea como EUROCONTROL y la FAA de los Estados Unidos, la Internet y otras fuentes que se describen a continuación.

5.13 El enfoque avanzado trata de cotejar los diversos tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto en estudio con los motores que los equipan. Los aeropuertos normalmente cuentan con listas de combinaciones de tipo de aeronave y motor obtenidas de los transportistas que operan en los mismos. No obstante, si no se dispone de esta información, los Estados tienen acceso a varias bases de datos disponibles públicamente que permiten cotejar los tipos de aeronaves con motores específicos. En el Adjunto C de este apéndice se describen estas importantes bases de datos que pueden ayudar a los analistas a identificar las combinaciones de aeronave y motor que caracterizan la mezcla de flota en un determinado aeropuerto.

5.14 Otras fuentes de información comprenden la base de datos de la Guía oficial internacional de líneas aéreas (IOAG) que contiene datos que identifican el tipo de aeronave, transportista y frecuencia de los vuelos regulares. Además, la IOAG enumera los vuelos regulares de pasajeros por líneas aéreas participantes, actualizándolos con carácter mensual. La IOAG proporciona los componentes principales para determinar la mezcla de flota en un determinado aeropuerto como el aeropuerto, tipo de aeronave, transportista y frecuencia de las llegadas y salidas de aeronaves. No obstante, la IOAG no incluye vuelos no regulares y chárter o de aviación general incluyendo los reactores de negocios. La IOAG abarca los vuelos de todas las líneas aéreas regulares de los Estados Unidos y la mayoría de las líneas aéreas regulares del mundo. Concretamente, en el Adjunto C se proporciona una descripción de los campos útiles contenidos en la base de datos de la IOAG. Los más importantes parámetros específicos de aeropuertos en la IOAG son el número de vuelo, tipo de aeronave, transportista y horario, cuando se determina el número de operaciones en un aeropuerto específico.

5.15 La base de datos del Registro de flotas mundiales de BACK Aviation Solution contiene información adicional sobre flotas de líneas aéreas como por ejemplo todas las aeronaves comerciales del mundo que se utilizan actualmente y otros diversos parámetros de aeronaves (en el Adjunto C figura una lista de campos útiles). Para fines de creación de inventarios de emisiones, los parámetros más importantes en la base de datos BACK (u otras bases de datos similares) son los identificadores de aeronave, número de cola, modelo de motor, número de motores y tipo de aeronave.

5.16 La Base de datos internacionales de flotas y líneas aéreas JP (JPFleets) de Bucher & Company es otra base de datos disponible públicamente que proporciona combinaciones de tipo de aeronave y motor para las principales líneas aéreas comerciales del mundo (en el Adjunto C figura una lista de campos de datos útiles).

5.17 La base de datos de Performance de calidad del servicio de las líneas aéreas (ASQP) puede obtenerse de la Oficina de Estadísticas de Transporte (BTS) del Departamento de Transporte (DOT) de los Estados Unidos. Esta base de datos contiene datos de performance y de vuelos de aproximadamente 20 de los principales transportistas de los Estados Unidos. En el Adjunto C figuran los campos útiles de esta base de datos ASQP. El analista debería tomar nota de que la base de datos ASQP proporciona una buena cobertura de las flotas que vuelan en los Estados Unidos y sus correspondientes mercados en el exterior.

5.18 Dependiendo de las razones para crear un inventario de emisiones, puede aplicarse un método diferente de asignar motores a las aeronaves. Un enfoque consiste en identificar los motores específicos utilizados para las operaciones de las aeronaves. Esto se logra recogiendo información sobre tipo de aeronaves, número de los vuelos regulares y datos de llegada/salida para un determinado aeropuerto (por ejemplo, utilizando IOAG), luego se buscarán los tipos específicos de motor asignados a las aeronaves identificadas por medio de las bases de datos disponibles descritas anteriormente. Si este grado de precisión no es necesario, entonces puede utilizarse un enfoque alternativo para identificar el motor.

5.19 Esta alternativa se basa en la popularidad de los motores en el seno de las flotas mundiales. Si los datos disponibles no permiten identificar combinaciones específicas de aeronave y motor en un determinado aeropuerto, éstas deberán estimarse. Una manera de hacerlo es extrapolar la información sobre combinaciones de aeronave y motor a partir de una mayor base de datos de flotas, como una base de datos de flotas mundiales. Por ejemplo, si la base de datos de referencia indica que un X por ciento de los B777 en la flota mundial tienen motores Y, entonces puede suponerse para fines de inventario aeroportuario que el X por ciento de los B777 que operan en ese aeropuerto tienen motores Y. Los Estados deben ser conscientes de que un único tipo de aeronave puede estar equipado con más de un tipo o subtipo de motores, lo que a su vez puede presentar distintas características de emisiones en un inventario mundial de líneas aéreas. Para estos casos, pueden utilizarse bases de datos como la BACK, JPFleets y otras a efectos de las líneas aéreas y categorías de aeronaves notificadas.

5.20 Cabe recordar que ninguna base de datos es totalmente exacta, y que los cambios debidos al reequipamiento de las aeronaves, mezclas internas temporarias, referencias entre base de datos y otras consideraciones pueden introducir con el tiempo niveles de inexactitud aún mayores. Por consiguiente, es importante recoger tanta información cercana a la fuente de la operación como sea posible a efectos de minimizar las incertidumbres.

### **Movimientos de aeronaves-enfoque avanzado**

5.21 La información sobre movimientos de aeronaves necesaria para el enfoque avanzado es casi idéntica a la del enfoque simple. Para el enfoque avanzado se debe conocer el número de movimientos u operaciones de aeronave por tipo de aeronave y motor. Cuando para cada combinación de aeronave y motor se calculan las emisiones del LTO único utilizando los insumos y ecuaciones indicadas, las emisiones totales se calculan multiplicando las emisiones del LTO único para cada aeronave y motor por el número correspondiente de movimientos sumando todo en la totalidad de la gama de combinaciones de aeronave y motor y movimientos para el período requerido.

### Flota y movimientos de aeronaves-enfoque sofisticado

5.22 En el enfoque sofisticado, se supone que el modelizador cuenta con la información actualizada y exacta del número de motores y el nombre y designación correcta de los mismos para cada movimiento unitario disponible. El cotejo entre aeronaves y motores se realiza mediante el número de registro de la aeronave en relación con el identificador único del motor (UID) de la OACI, o similar.

5.23 El total de movimientos se obtiene de la información de movimientos reales para cada aeronave individual que presta servicios al aeropuerto en cuestión. Cada movimiento (aterrizaje o despegue) se registra según el número de registro de la aeronave para proporcionar la información detallada sobre los motores. Por consiguiente, el número de movimientos para un determinado tipo de aeronave pueda comprender varios números de este tipo, pero según números diferentes de registro de aeronaves.

## 6. CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE LOS MOTORES PRINCIPALES DE LAS AERONAVES

### Flujo de combustible e índices de emisión

6.1 Los motores de aeronave con una potencia nominal superior a 26,7 kN son certificados por la OACI respecto de las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO, y HC y SN máximo, sobre la base del ciclo LTO normalizado según se establece en el Anexo 16, Volumen II, y se publicó originalmente en el Doc 9646 (1995) y enmiendas del sitio web. La OACI proporciona los datos de certificación respecto de las emisiones en la web mundial en <http://www.easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. A medida que se certifican nuevos motores, se efectúan actualizaciones del Banco de datos sobre las emisiones de los motores de aeronaves (EEDB). En el Adjunto A figura un ejemplo del EEDB de la OACI. Se proporciona información adicional en el Adjunto D, que trata específicamente sobre las emisiones de materia particulada de los motores de las aeronaves.

6.2 Cuando se utilizan datos de la OACI sobre motores para calcular emisiones de las aeronaves, es importante seleccionar el valor promedio medido del contaminante y no el nivel característico del mismo, que también se notifica en el banco de datos de la OACI. El nivel característico de un contaminante gaseoso o humo se obtiene para fines de certificación y contiene coeficientes estadísticos que corresponden al número de motores ensayados.

6.3 Para la amplia mayoría de motores de aeronaves comerciales que operan en los aeropuertos principales, el flujo de combustible y los valores EI se notifican en el EEDB de la OACI, a los cuatro reglajes de empuje para certificación. Los EI de los motores de aeronave se notifican en gramos de contaminante por kilogramo de combustible consumido (g/kg), y los regímenes de flujo de combustible para cada modo se notifican en kilogramos por segundo (kg/s). La OACI recomienda que los valores EI y de flujo de combustible notificados se utilicen para calcular las emisiones de los motores principales de las aeronaves.

6.4 Existen otras bases de datos disponibles que tratan la información de EI y de flujo de combustible para los motores de aeronave que no están certificadas o reglamentadas por la OACI. Las siguientes son dos de las principales bases de datos no abarcadas por la OACI.

6.5 La Agencia sueca de investigaciones para la defensa (FOI) mantiene una base de datos de EI para motores turbohélices suministrados por los fabricantes para fines de crear inventarios de emisiones. Aunque la base de datos está públicamente disponible solo a través de la FOI, el Consejo coordinador internacional de asociaciones de industrias aeroespaciales (ICCAIA) vigila estrechamente a quienes solicitan el uso de la base de datos para asegurar que éstos no se emplean con fines espurios. La base de datos de la FOI no está avalada por la OACI debido a que dichos datos no están certificados y pueden tener inexactitudes debidas principalmente a las metodologías de ensayo no reglamentadas.

También existe el aspecto importante de que ese establezca un reglaje de marcha lenta apropiado para los turbohélices. Por consiguiente, si bien estos datos no son datos sobre emisiones de motores de aeronaves certificados por la OACI, se incluye esta información en el presente texto de orientación reconociendo que la base de datos sobre turbohélices de la FOI puede ayudar a los aeropuertos a crear inventarios de emisiones. Actualmente, no se dispone de documentación sobre la forma en que se obtuvieron los EI y los tipos de motores turbohélices correspondientes. La información sobre motores turbohélices TIM sugeridos y la forma de obtener los datos de la FOI puede solicitarse en: <https://www.foi.se/en/foi/research/aeronautics-and-space-issues/environmental-impact-of-aircraft.html>.

6.6 La Oficina Federal de Aviación Civil (FOCA) de Suiza ha elaborado una metodología y un sistema de medición para obtener datos sobre emisiones de aeronaves y helicópteros con motores de pistón. Para estos tipos de motor no se exige la certificación respecto de las emisiones; por consiguiente, los datos de la FOCA son una de las pocas fuentes de datos disponibles para crear inventarios de emisiones con respecto a aeronaves equipadas con estos motores. No obstante, los datos de la FOCA no han sido corroborados por la OACI y no están avalados por la Organización. Por consiguiente, aunque estos datos no sean datos sobre emisiones de motores de aeronaves certificados por la OACI, esta información se incluye en el presente texto de orientación reconociendo que los datos de la FOCA pueden ayudar a los aeropuertos a crear inventarios de emisiones de ciertas aeronaves para las cuales de otra manera no se dispondría de fuentes de datos. El lector puede consultar el sitio web de la FOCA para obtener documentación sobre el sistema de medición de las emisiones, la metodología uniforme de medición y recomendaciones sobre el uso de sus datos para la creación de inventarios de emisiones simples utilizando TIM sugeridos. Todo el material se puede obtener en forma abierta en [www.bazl.admin.ch](http://www.bazl.admin.ch) → Portal for Specialists → Regulations and Guidelines → Environment → Pollutant Emissions → Aircraft Engine Emissions.

### Cálculo de las emisiones — enfoque simple (Opción A)

#### Índices de emisión

6.7 En el enfoque simple (Opción A), EI se sustituye por un factor de emisión (EF),<sup>5</sup> y en la Tabla B-1 del Adjunto B se proporcionan los factores de emisión para cinco especies de contaminantes para cada aeronave en la lista.

6.8 El factor de emisión se proporciona en términos de kg de cada especie de emisión por ciclo LTO por aeronave (y número de partículas). Estas se han calculado sobre la base del tipo de motor representativo de cada tipo de aeronave genérica y aplicando los TIM de la OACI, reglajes de empuje y otras hipótesis básicas. En las notas de la Tabla B-1 del Adjunto B se describen otras hipótesis.

#### Cálculo de las emisiones

6.9 Para NO<sub>x</sub>, HC, CO, nvPMmass, nvPMnumber, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> existe un método normalizado de calcular las emisiones de motores de aeronaves utilizando el enfoque simple (Opción A). Para cada tipo de aeronave, se multiplica el número de ciclos LTO de dicha aeronave (a lo largo del periodo de evaluación) por el factor de emisión que figura en la Tabla B-1 para cada una de las especies de contaminantes y luego se suman los valores para todas las aeronaves obteniéndose la cantidad de emisiones totales (en kg) para cada contaminante. Véase la siguiente ecuación genérica:

$$\text{emisión de especies X (en kg)} = \sum_{\text{todas las aeronaves}} (\text{número de ciclos LTO de aeronaves Y}) \times (\text{factor de emisión para especies X}) \quad \text{Ecuación 3-A1-1}$$

5. EI = índice de emisión, expresado como g de contaminante por kg de combustible; EF = factor de emisión, expresado como masa de contaminante por unidad especificada (por ejemplo, aeronave).



6.10 Cabe señalar que esta ecuación no tiene en cuenta tipos de motor, modos de operación o TIM específicos porque supone que las condiciones del estudio son iguales o similares a los datos por defecto que se utilizan.

6.11 Si se necesita para el inventario, se aplica un proceso similar para el consumo de combustible a lo largo del período en consideración utilizando los datos de consumo de combustible de la Tabla B-1:

$$\text{consumo de combustible (en kg)} = \sum_{\text{todas las aeronaves}} (\text{número de ciclos LTO de aeronaves Y}) \times (\text{consumo de combustible}). \quad \text{Ecuación 3-A1-2}$$

### Cálculo de las emisiones — enfoque simple (Opción B)

#### Tiempo en el modo (TIM) de las aeronaves

6.12 Como se analizó anteriormente, el TIM de referencia utilizado como parte del proceso de la OACI para la certificación respecto de las emisiones de los motores (que figura en el EEDB de la OACI) resulta apropiado solamente para el proceso de certificación de los motores y no es representativo del TIM real que la aeronave insumió en operaciones en el mundo real (véase 2.1 a 2.8). Sin embargo, el TIM por defecto de la OACI puede proporcionar una estimación conservadora de las emisiones de las aeronaves en un aeropuerto cuando no se dispone de datos de TIM de rodaje/marcha lenta en tierra específicos del aeropuerto o de métodos refinados de estimar los tiempos de despegue, ascenso y aproximación. Análisis de sensibilidad realizados por el CAEP determinaron que la creación de un inventario de emisiones de aeronaves utilizando los TIM de certificación de la OACI (así como el flujo de combustible y el EI) normalmente produce una sobreestimación de las emisiones totales de las aeronaves en todo el ciclo LTO.

6.13 Si bien el TIM por defecto de la OACI se aplica principalmente a los motores reglamentados, puede haber otros TIM por defecto disponibles para otros tipos de motor (por ejemplo, motores turbofan no reglamentados, motores turbohélice, motores de pistón o helicópteros). Las fuentes de dicha información comprenden las autoridades nacionales de aviación o de medio ambiente (por ejemplo, TIM sugerido por la FOI para motores turbohélice).

#### Metodología de cálculo de emisiones para NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPM<sub>mass</sub> y nvPM<sub>number</sub>

6.14 La identificación del tipo de aeronave permitirá determinar el número de motores y los modelos de motor apropiados. A su vez, el modelo de motor determinará el EI adecuado para calcular las emisiones de la aeronave.

6.15 Para determinar las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPM<sub>mass</sub> o nvPM<sub>number</sub> para una única combinación de aeronave y motor, puede utilizarse la fórmula siguiente. Este método se repite para cada tipo de aeronave/motor que representa cada TIM a efectos de establecer un inventario completo de emisiones de aeronaves.

$$E_{ij} = \sum (\text{TIM}_{ijk} * 60) * (\text{FF}_{jk}) * (E_{ijk}) * (N_{ej}) \quad \text{Ecuación 3-A1-3}$$

donde:

$E_{ij}$  = emisiones totales de contaminantes  $i$ . Por ejemplo, NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPM<sub>mass</sub> (en gramos) o nvPM<sub>number</sub> (en número de partículas), producidas por el tipo de aeronave  $j$  para un ciclo LTO;

- $E_{ijk}$  = índice de emisión para el contaminante  $i$ . Por ejemplo,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{nvPM}_{\text{mass}}$  [en gramos por contaminante por kilogramo de combustible (g/kg de combustible)] o  $\text{nvPM}_{\text{number}}$  [en número de partículas por kg de combustible (#/kg de combustible)], en el modo  $k$  (por ejemplo, despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación) para cada motor empleado en el tipo de aeronave  $j$ ;
- $\text{FF}_{jk}$  = flujo de combustible para el modo  $k$  (por ejemplo, despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación), en kilogramos por segundo (kg/s), para cada motor empleado en el tipo de aeronave  $j$ ;
- $\text{TIM}_{jk}$  = tiempo en el modo para el modo  $k$  (por ejemplo, marcha lenta, aproximación, ascenso y despegue), en minutos, para el tipo de aeronave  $j$ ; y
- $\text{Ne}_j$  = número de motores empleados en el tipo de aeronave  $j$ .

6.16 Si el TIM medido real para uno o más de los modelos en operación existe y se emplea, entonces las diferentes fases de vuelo deben calcularse por separado y las emisiones totales para cada especie deben sumarse a efectos de obtener las emisiones totales para cada tipo de aeronave/motor.

6.17 La OACI no tiene normas de certificación respecto de emisiones para  $\text{SO}_x$ . No obstante, las emisiones de  $\text{SO}_x$  son función de la cantidad de azufre presente en el combustible. La EPA de los Estados Unidos realizó un estudio del contenido de azufre en el combustible de los reactores de la aviación comercial, que dio como resultado un promedio en Estados Unidos de 1 gramo por 1 000 gramos de combustible consumido (El  $\text{SO}_x = 1 \text{ g/kg}$  de combustible). No debería confiarse en este promedio cuando se necesiten datos validados, pero el mismo puede utilizarse para realizar un inventario de emisiones de  $\text{SO}_x$  utilizando la ecuación siguiente:

$$E_j = \sum (\text{TIM}_k * 60) * (E_{rjk}) * (\text{Ne}_j) \quad \text{Ecuación 3-A1-4}$$

donde:

- $E_j$  = emisiones totales de  $\text{SO}_x$ , en gramos, producidas por el tipo de aeronave  $j$  para un ciclo LTO;
- $\text{Ne}_j$  = número de motores utilizados en el tipo de aeronave  $k$ ;
- $E_{rjk}$  =  $1 * (\text{FF}_{jk})$ ;

donde:

- $E_{rjk}$  = régimen de emisiones de  $\text{SO}_x$  total en unidades de gramos de  $\text{SO}_x$  emitidos por segundo por modo operacional  $k$  para el tipo de aeronave  $j$ ; y
- $\text{FF}_{jk}$  = el flujo de combustible notificado por modo en kilogramos por segundo (kg/s) por modo operacional  $k$  para cada motor utilizado en el tipo de aeronave  $j$ .

6.18 Se prevé que habrá más EI medidos y normalizados para  $\text{nvPM}_{\text{mass}}$  y  $\text{nvPM}_{\text{number}}$  disponibles públicamente a raíz de la adopción de la primera Norma de la OACI sobre emisiones de materia particulada de los motores de las aeronaves, aplicable a partir del 1 de enero de 2020 a todos los motores turbofan en producción con empuje nominal superior a 26,7 kN. Mientras no haya EI certificados para  $\text{nvPM}$  en masa y en número disponibles públicamente, será necesario calcular los EI para  $\text{nvPM}$  para la elaboración de los inventarios de las emisiones de los aeropuertos. En cuanto haya valores de  $\text{nvPM}$  certificados disponibles públicamente, deberían utilizarse esos valores en lugar de los valores estimados. La PM volátil se regula indirectamente por los límites de  $\text{HC}$  y  $\text{NO}_x$  y las especificaciones del

combustible. No se prevé que haya datos de mediciones certificadas para la PM volátil, por lo que será necesario calcular dichos valores a largo plazo. Los cálculos de las emisiones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  de los escapes de los motores mejorarán una vez que haya datos disponibles de mediciones de  $nvPM_{mass}$  certificadas, pero el componente de PM volátil tendrá que seguir calculándose en todos los casos.

6.19 En el contexto de elaboración de la nueva reglamentación sobre  $nvPM$ , se actualizó el método provisional de Aproximación de Primer Orden, versión 3 (FOA3.0), que se había proporcionado en una versión anterior de este documento. La actualización incluye una relación más estrecha entre SN y concentración de  $nvPM$  en masa ( $nvPM_{mass}$ ), mejoramiento de algunas constantes y, por primera vez, la inclusión de una estimación aproximada de la  $nvPM$  en número ( $nvPM_{number}$ ). El método de cálculo de la PM volátil basado en contenido de azufre y materia orgánica en el combustible, propuesto en FOA3.0, no cambió. La metodología actualizada completa se incluye en el Adjunto D, con la nueva denominación FOA4.0. Al igual que en las versiones anteriores del método FOA, la FOA4.0 está concebida para ser utilizada únicamente con el propósito de elaborar los inventarios de emisiones en las inmediaciones de los aeropuertos, y no debería utilizarse cuando se requieran datos exactos y validados. El CAEP se compromete a actualizar continuamente la versión FOA4.0 a medida que se disponga de más datos y avances científicos.

### **Cálculo de las emisiones — enfoque avanzado (Opciones A y B)**

6.20 Los métodos avanzados de cálculo de emisiones utilizan los modelos de performance que tienen en cuenta o modelan la información ambiental y la información operacional relacionada con una aeronave específica. En este contexto, se necesita información adicional que pueda obtenerse más fácilmente por el modelizador a partir de fuentes publicadas. Dicha información puede incluir lo siguiente: información sobre la aeronave (masa de despegue, motor real), información sobre el aeropuerto (elevación del aeródromo, longitud de la pista en uso), información ambiental (velocidad y dirección del viento, turbulencia, presión, temperatura, humedad) e información operacional (destino, puesto de estacionamiento, pista, ruta de salida, ruta de aproximación y pendiente de planeo, uso de APU). La información realmente necesaria depende del modelo utilizado y puede variar. Véase también la Tabla 3-A1-2 para orientación adicional sobre los parámetros que han de utilizarse.

#### **Niveles de empuje**

6.21 Si bien el ciclo LTO de certificación sugiere reglajes específicos de empuje para cada modo, cualquier ciclo LTO operacional puede tener distintos modos con más reglajes de potencia individuales (véase la sección 3). Concretamente, el empuje de despegue es a menudo menor que el 100% de la certificación por razones de performance y rentabilidad. Cada vez más aeronaves operan utilizando regímenes de empujes flexibles, a veces en combinación con opciones de empuje no nominal. Esto podría aplicarse a la fase de despegue de un vuelo, así como a otras fases de vuelo en el ciclo de aterrizaje y despegue.

6.22 Al igual que con la opción A, puede disponerse de un nivel de empuje reducido promedio del aeropuerto o específico del grupo de aeronaves principalmente para la fase de despegue, pero también puede estar disponible para otros modos. Esta información podía obtenerse de datos empíricos, por ejemplo, de un explotador de aeronaves y extrapolarse sobre el total de las operaciones.

6.23 En la opción B, debería utilizarse un modelo de performance de aeronave especializado que proporcione un nivel de empuje operacional utilizando parámetros adicionales y públicamente disponibles exclusivos del modelo. El nivel de empuje podría modelizarse para el despegue solamente o para todos los modos del ciclo LTO.

### **Tiempo en el modo**

6.24 Como opción A, se alienta a los aeropuertos a realizar mediciones de los tiempos de rodaje típicos específicos de la estructura de calle de rodaje del aeropuerto para el rodaje desde la pista a la terminal y viceversa para los tiempos de rodaje hacia la pista, incluyendo posibles tiempos de cola en las pistas de salida. Aplicando los valores de tiempo de rodaje medidos para el aeropuerto en estudio se puede tener un mejor panorama de las emisiones correspondientes al modo de rodaje/marcha lenta del ciclo LTO. Estos datos podrían obtenerse, por ejemplo, de las horas de toma de contacto, llegada al puesto de estacionamiento, fuera calzos y despegue para todas las posibles combinaciones de puesto de estacionamiento/pista o como valor por defecto de un aeropuerto.

6.25 Al igual que en la opción B, el TIM también podría modelizarse para otros modos distintos del modo de rodaje únicamente. Esta opción comprendería muy probablemente un enfoque de modelización de la performance de la aeronave, dando TIM individuales para grupos de aeronaves o incluso tipos de aeronave para aquellos modos considerados en el enfoque (por ejemplo, más que los cuatro modos de certificación de la OACI).

### **Flujo de combustible**

6.26 Para la opción A, se ha elaborado una relación que utiliza datos de certificación del flujo de combustible y de empuje obtenidos del EEDB de la OACI para determinar el flujo de combustible a cualquier nivel de empuje deseado entre el 60% y el 100%.

*Nota. — Los niveles de empuje son un porcentaje del empuje nominal y representan el empuje seleccionado por el piloto. No representan el empuje real proporcionado por el motor (empuje neto corregido).*

6.27 Esta metodología permite el cálculo exacto del flujo de combustible a niveles de empuje de despegue reducidos que, en algunos casos, podrían ser tan bajos como el 60% del empuje nominal. A partir de este flujo de combustible, pueden calcularse los correspondientes EI utilizando la metodología de ajuste de curvas Flujo de combustible método 2 de Boeing (BFFM2). Se ha elaborado una metodología que utiliza dos funciones cuadráticas como se describe a continuación.

6.28 El método de dos funciones cuadráticas comprende el cálculo del flujo de combustible en función del empuje, para empujes por encima del 60% del empuje nominal máximo. El flujo de combustible y los datos de empuje necesarios para definir ambas curvas están disponibles en el EEDB de la OACI para motores certificados. La metodología es la siguiente:

- a) empuje del 60% al 85%: se define por una ecuación cuadrática basada en el empuje de 7%, 30% y 85% y puntos de flujo de combustible conexos;
- b) empuje de 85% a 100%: se define por una ecuación cuadrática basada en el empuje de 30%, 85% y 100% y puntos de flujo de combustible conexos.

Estas dos ecuaciones cuadráticas quedan unívocamente definidas por sus tres puntos y sus curvas se encuentran a un empuje del 85%. Las pendientes de las dos curvas a un empuje de 85% pueden ser distintas (la “acodadura” que se muestra en el diagrama de la Figura 3-A1-2).

6.29 Una ecuación cuadrática que se ajuste a tres puntos de la curva no dimensionada de flujo de combustible en función del empuje tiene los siguientes parámetros:

$X = (\text{empuje})/(\text{empuje nominal máximo})$ , cuadrática definida por los valores  $X_1, X_2, X_3$ ;

$Y = (\text{flujo de combustible})/(\text{flujo de combustibles al empuje nominal máximo})$ , valores  $Y_1, Y_2, Y_3$ ;

obteniéndose:

$$Y = AX^2 + BX + C$$

con tres puntos conocidos:

$$Y_1 = AX_1^2 + BX_1 + C$$

$$Y_2 = AX_2^2 + BX_2 + C$$

$$Y_3 = AX_3^2 + BX_3 + C$$

Se puede resolver A, B y C como:

$$A = (Y_3 - Y_1) / ((X_3 - X_1) * (X_1 - X_2)) - (Y_3 - Y_2) / ((X_3 - X_2) * (X_1 - X_2))$$

$$B = (Y_3 - Y_1) / (X_3 - X_1) - A * (X_3 + X_1)$$

$$C = Y_3 - A * X_3^2 - B * X_3$$

A, B y C varían para diferentes UID de motor.

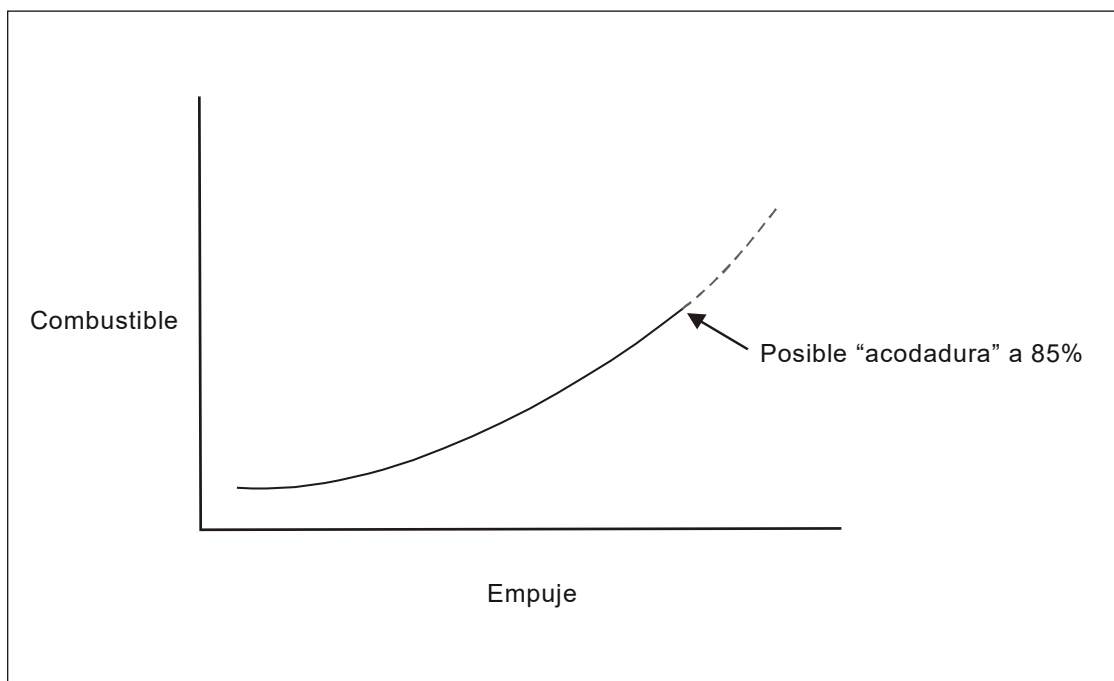


Figura 3-A1-2. Ilustración con diagrama de ajuste de dos curvas cuadráticas

**Para empujes seleccionados entre el 85% y el 100% del empuje nominal**

6.30 Se utilizan puntos conocidos del EEDB de la OACI para el UID del motor al 30%, 85% y 100% para obtener A, B y C según se indicó anteriormente. Estos a su vez se utilizan en la ecuación cuadrática genérica:

$$Y = AX^2 + BX + C$$

donde X es el (empuje seleccionado)/(empuje nominal máximo)

para obtener Y [= (flujo de combustible deseado)/(flujo de combustible al empuje nominal máximo)] al empuje seleccionado.

6.31 El flujo de combustible al empuje seleccionado se obtiene multiplicando Y por el flujo de combustible del EEDB de la OACI al empuje nominal máximo. La curva cuadrática superior se aplica solamente entre el 85% y el 100% del empuje nominal.

**Para empujes seleccionados entre 60% y 85% del empuje nominal**

6.32 Para obtener A, B y C se utilizan puntos de bancos de datos conocidos para el motor UID a 7%, 30% y 85%. Estos se aplican luego en la ecuación cuadrática genérica:

$$Y = AX^2 + BX + C$$

donde X es el (empuje seleccionado)/(empuje nominal máximo)

para obtener Y (= (flujo de combustible)/(flujo de combustible al empuje nominal máximo)) al empuje seleccionado.

6.33 El flujo de combustible al empuje seleccionado se obtiene multiplicando Y por el flujo de combustible del EEDB de la OACI al empuje nominal máximo. La curva cuadrática inferior se aplica entre el 60% y el 85% del empuje nominal solamente.

**Ejemplo de cálculo para UID 8RR044, Rolls-Royce Trent 553-61**

- 1) Determinación de la curva cuadrática entre 85% y 100% del empuje nominal

$$X1 = 0,30$$

$$X2 = 0,85$$

$$X3 = 1,00$$

con datos de flujo de combustible del EEDB de la OACI:

$$Y1 = 0,2844$$

$$Y2 = 0,8199$$

$$Y3 = 1,0000$$

$$\rightarrow A = 0,3242$$

$$\rightarrow B = 0,6009$$

$$\rightarrow C = 0,07491$$

$$\rightarrow Y = 0,3242 X^2 + 0,6009 X + 0,0749$$

(1)

## 2) Determinación de la curva cuadrática entre 60% y 85% del empuje

$$X1 = 0,07$$

$$X2 = 0,30$$

$$X3 = 0,85$$

con datos de flujo de combustible del EEDB de la OACI:

$$Y1 = 0,1090$$

$$Y2 = 0,2844$$

$$Y3 = 0,8199$$

$$\rightarrow A = 0,2709$$

$$\rightarrow B = 0,6622$$

$$\rightarrow C = 0,0613$$

$$\rightarrow Y = 0,2709 X^2 + 0,6622 X + 0,0613$$

(2)

## 3) Resultados para empuje seleccionado (ejemplos)

Empuje de 70% ( $X = 0,7$ ): ecuación (2):  $Y = 0,6576$  → multiplicar por flujo de combustible al empuje nominal máximo → flujo de combustible = 1,388 kg/s

Empuje de 90% ( $X = 0,9$ ): ecuación (1):  $Y = 0,8783$  → multiplicar por flujo de combustible al empuje nominal máximo → flujo de combustible = 1,853 kg/s.

6.34 Para la opción B, se utilizaría un modelo de performance para obtener/calcular datos de flujo de combustible operacionales utilizando diversos datos adicionales (por ejemplo, ATOW o longitud de la etapa o información pertinente al cálculo del flujo de combustible) conjuntamente con el EEDB de la OACI. Como ejemplos, pueden utilizarse modelos como el BADA o PIANO o ADAECAM.

**Índices de emisión**

6.35 **Opción A.** Los índices de emisión para la opción A se calcularán a partir de los datos del EEDB de la OACI utilizando el método de "interpolación lineal en escala log-log" empleado en el método BFFM2, aplicando los datos del flujo de combustible calculados por la metodología indicada en 6.29.

6.36 **Opción B.** Los índices de emisión "operacionales" se obtienen a partir de los datos del EEDB de la OACI utilizando el método de "interpolación lineal en escala log-log" empleado en el método BFFM2, aplicando los datos del flujo de combustible operacionales del método descrito en 6.34.

**Aplicación de parámetros adicionales que pueden influir  
en las emisiones, si corresponde**

**Advertencias importantes para los modelizadores que aplican métodos avanzados**

6.37 A diferencia del enfoque simple, los diferentes métodos bajo el encabezamiento de métodos avanzados pueden incluir ya algunos aspectos de las correcciones para parámetros adicionales como las condiciones ambientales. Es importante evitar la doble contabilidad en estos casos. Por consiguiente, la aplicación de las correcciones puede diferir entre métodos diferentes. También es importante tener en cuenta que ciertas condiciones ambientales suficientemente alejadas respecto de la norma pueden hacer que el avión o el motor alcance los límites operacionales. Por ejemplo, muchos motores

no podrán proporcionar empuje nominal completo más allá de cierto límite de temperatura (normalmente ISA + 15°C, pero este límite varía). El modelizador debe tener cuidado de no extrapolar una metodología más allá de las condiciones para las cuales es válida.

### **Aplicación al enfoque avanzado opción B**

6.38 Si se utiliza un modelo de performance de aeronave para calcular las condiciones de operación de aviones y motores (enfoque avanzado de opción B), entonces ya debería incluir las consecuencias de la velocidad de avance sobre el flujo de combustible. Dependiendo del modelo, también puede incluir las consecuencias de las condiciones ambientales. El modelizador debe saber cómo funciona el modelo. Si es necesario corregir el modelo de performance del avión o del flujo de combustible para tener en cuenta con exactitud estas consecuencias, el modelizador debería hacerlo en esta etapa.

6.39 Después de haberse determinado correctamente la performance del avión y el flujo de combustible en el marco del enfoque avanzado opción B, los índices de emisión deberían calcularse aplicando un método de flujo de combustible. Un método de flujo de combustible documentado<sup>6</sup> es el método BFFM2. Dependiendo de las necesidades del modelizador y de los datos disponibles, pueden aplicarse otros métodos, aunque se recomienda el BFFM2 como opción por defecto.

6.40 Según se describe en SAE AIR5715, el BFFM2 tiene en cuenta las consecuencias a las condiciones ambientales y de la velocidad de avance. Es importante reconocer que, si las consecuencias de las condiciones ambientales y de la velocidad de avance han de considerarse, no es suficiente utilizar solamente el cálculo inicial de los EI a partir de los métodos de ajuste de curvas definidos para el BFFM2. No obstante, el método BFFM2 completo comprende correcciones para estos dos tipos de consecuencias, de modo que si se utiliza no se necesitarían más correcciones a los EI.

### **Aplicación al enfoque avanzado opción A**

6.41 Los métodos que corresponden al enfoque avanzado opción A, si bien son menos sofisticados y exactos, pueden ser también más complicados de ajustar a las condiciones ambientales. En primer lugar, la performance del avión (empuje, TIM, etc.) podría tener que ajustarse según las condiciones ambientales. Luego, dado que el flujo de combustible se habría calculado a partir del nivel de empuje pertinente en condiciones estáticas ISA (debido a que el flujo de combustible no se basa en un modelo de performance de aeronave en esta opción), deberían implantarse correcciones para las condiciones ambientales y la velocidad de avance. El resultado sería un flujo de combustible, corregido para ambos conjuntos de condiciones, pero sin la exactitud (o resolución temporal y espacial) de un modelo de opción B.

6.42 El cálculo de los EI y su corrección con respecto a las consecuencias de las condiciones ambientales y de la velocidad de avance podría entonces aplicar el mismo enfoque que para la opción B avanzada. No obstante, debido a que el flujo de combustible y las condiciones de vuelo no son conocidas con el mismo grado de resolución que para la opción B, los resultados obtenidos al aplicar un método como el BFFM2 podrían no ser exactos o incluso bien definidos. El BFFM2 se define solamente para condiciones de vuelo plenamente especificadas<sup>7</sup> y no puede aplicarse directamente a un "modo" entero como el despegue o el ascenso inicial. Podría suponerse una condición de vuelo plenamente especificada que represente al avión para todo el TIM, o tendría que utilizarse un método diferente para determinar los EI. Este método diferente podría ser una modificación del BFFM2, o podría no tener relación con el mismo. Entonces, la aplicación de correcciones correspondientes a la velocidad de avance y condiciones ambientales a los cálculos del enfoque avanzado opción A dependerá de los detalles del modelo y los requisitos del modelizador.

---

6. SAE AIR5715.

7. Plenamente especificado: se conocen el vector de estado (posición tridimensional, velocidad, altitud), los parámetros del motor y la configuración de la célula.



### **Efectos de la altitud**

6.43 Los efectos de la altitud sobre un motor de aeronave están regidos por la presión, temperatura y humedad locales. Por consiguiente, los efectos de la altitud sobre las emisiones de los motores se tratarán correctamente si se aplican los enfoques descritos anteriormente y las condiciones ambientales empleadas son las locales del avión en vuelo.

### **Deterioro de los motores**

6.44 Aunque los fabricantes de aeronaves y motores siempre diseñan sus productos para que presenten la eficiencia máxima en la entrega, a medida que las aeronaves ingresan en el servicio de pago puede, con el tiempo, experimentarse algún deterioro de la performance debido a las duras condiciones ambientales en que funcionarán la aeronave y los motores. La erosión, el deterioro de los sellos y la acumulación de suciedad en el equipo giratorio afinado y en las células durante largos períodos de tiempo pueden conducir a una pérdida de performance. Con el tiempo, si no se soluciona, el deterioro puede dar como resultado considerables aumentos del consumo de combustible. Los aumentos del consumo de combustible son un aumento de costos innecesarios para los transportistas, y por ello normalmente éstos realizarán el mantenimiento de sus productos para conservar el nivel de pérdida de performance a niveles aceptables. Un análisis efectuado por el Grupo de trabajo 3 (WG3) del CAEP evaluó el impacto del deterioro de aeronaves y motores y proporcionó la orientación siguiente respecto de cómo y cuándo aplicar dicho deterioro en la construcción de inventarios de aeropuertos.

6.45 El deterioro de célula y motor durante el servicio para fines de inventarios de aeropuertos (es decir el ciclo LTO por debajo de 3 000 ft) tiene un efecto pequeño pero real en el consumo de combustible y en las emisiones de NO<sub>x</sub>. No hay pruebas que indiquen efectos del deterioro en emisiones de CO o HC. Para el humo y la nvPM, hay pruebas del efecto del deterioro en algunos de los motores sometidos a ensayo. Es una cuestión que es preciso seguir investigando. En este momento, no pueden indicarse correcciones aplicables a toda la flota.

6.46 Como medida de ahorro de costos, las líneas aéreas adoptan precauciones para mantener los efectos del deterioro en un mínimo mediante el establecimiento de programas de mantenimiento periódicos. Sobre la base de análisis de datos de líneas aéreas teóricos y reales, la magnitud de los efectos del deterioro, sobre toda la flota, pueden ser los siguientes:

Consumo de combustible	+3%
Emisiones de NO <sub>x</sub>	+3%
Emisiones de CO	sin cambios
Emisiones de HC	sin cambios
Índice de humo	sin cambios
nvPM <sub>mass</sub> y nvPM <sub>number</sub>	sin cambios

6.47 Para aplicar a la modelización, incluyendo los inventarios de emisiones, el uso apropiado de esta información sobre deterioro en las actividades de modelización depende del modelo, las hipótesis y los datos de entrada. Concretamente, los modelos y las hipótesis ya pueden incluir un margen de deterioro, ya sea explícitamente (es decir, datos operacionales reales del motor o calibrados/validados respecto de datos reales durante el servicio), implícitamente (es decir, factores de corrección de flujo de combustible conservadores aplicados a los valores de certificación del motor), o ya pueden incluir criterios conservadores que compensan considerablemente los efectos del deterioro sobre el consumo del combustible y las emisiones NO<sub>x</sub>. Debe procederse con cautela para evitar la doble contabilidad.

6.48 El enfoque simple es una sobreestimación considerable de las emisiones y consumo de combustible de las aeronaves. El margen de conservatismo del enfoque simple es suficientemente amplio como para excluir la aplicación de los efectos del deterioro.

6.49 El enfoque avanzado permite aplicar diferentes reglajes de empuje a las metodologías de flujo de combustible, así como a algún tipo de cálculo de performance de aeronave. Si bien los resultados son más exactos que en el enfoque simple, la comparación con datos del registrador de datos de vuelo (FDR) sugiere que, para métodos normalmente aplicados, todavía existe un nivel de conservatismo en toda la flota respecto de los cálculos de flujo de combustible resultantes del uso del TIM, peso de despegue (TOW) y reglajes de mandos estimados sobre la base de la performance en el ciclo LTO. Los factores de deterioro se consideran menores que el conservatismo inherente que ya existe en el método, y por consiguiente no se recomienda la aplicación de factores de deterioro.

6.50 Cuando el enfoque sofisticado utiliza datos reales de performance operacional de motores o aeronaves (incluyendo el flujo de combustible operacional), entonces ello incluiría en forma inherente los efectos del deterioro reales. Una vez más, la aplicación de los factores de deterioro no se recomienda.

6.51 Una excepción a la recomendación indicada podría tener lugar en el uso de una combinación de métodos avanzado y sofisticado aplicando combinaciones reales de motores y aeronaves, TIM, TOW y reglajes de mandos promediados o medidos, combinados con regímenes de flujo de combustible calculados a partir de los datos de certificación de la OACI. En este caso, se recomienda la aplicación de factores de deterioro.

6.52 El deterioro del consumo de combustible debería aplicarse sólo a la modelización en las cercanías de los aeropuertos (es decir, el ciclo LTO) y no debería aplicarse para la modelización global donde el factor de deterioro podría ser diferente que los valores notificados aquí.

### **Cálculo de emisiones del arranque**

6.53 Durante la secuencia de arranque se producen muy pocas emisiones de  $\text{NO}_x$  comparadas con el ciclo LTO debido a las muy bajas temperaturas y presiones de los motores, y las únicas emisiones que merecen consideración durante la secuencia de arranque son las de HC. El arranque del motor principal de la aeronave puede dividirse normalmente en dos fases: preencendido y postencendido.

#### ***Preencendido del motor***

6.54 La fase de preencendido representa el tiempo transcurrido desde que el motor se ha puesto en marcha utilizando un motor de arranque y se ha permitido que el combustible ingrese al combustor para el encendido. Desde la iniciación del motor de arranque al encendido en el combustor pueden transcurrir varios segundos, pero ningún combustible ingresa al motor debido a que el sistema de combustible se está cebando y las válvulas de combustible están cerradas. Debido a la necesidad de breves tiempos de arranque, el sistema de combustión está diseñado para que el encendido ocurra con la primera o la segunda chispa del dispositivo de encendido, normalmente dentro de un segundo de abrirse las válvulas de combustible y no más de dos segundos. Esto también se ha confirmado en ensayos realizados por los fabricantes utilizando acceso óptico para ver llegar el combustible y observar el tiempo al encendido.

6.55 Las emisiones de preencendido serían puramente HC debido a que la combustión no se ha iniciado de modo que no se consume combustible dentro del combustor. Esto permite calcular directamente las emisiones de HC a partir del flujo de combustible. Durante el período de preencendido suceden tres cosas:

- a) la válvula de combustible se abre;
- b) el sistema inyector de combustible se llena y se inicia el flujo de combustible; y
- c) el dispositivo de encendido comienza a formar chispas y enciende al combustor.

### **Postencendido del motor**

6.56 En este punto, el proceso de arranque tiene lugar en condiciones de baja carga del motor. En estos puntos de las operaciones, las emisiones del motor serán principalmente de HC y CO. La influencia en las emisiones de nvPM actualmente se desconoce: la medición directa de las emisiones del arranque se hace difícil a causa del combustible no quemado y parcialmente quemado que contamina el equipo de muestreo de gases. Después del encendido con cargas de motor particularmente bajas, como sería el caso durante el arranque del motor, dominan las emisiones de HC. Por este motivo, se justifica atribuir las emisiones del arranque al HC solamente, lo que resulta en una estimación conservadora de las emisiones de hidrocarburo. Las emisiones de CO pueden ser más pesadas que las de HC para algunos motores a valores de marcha lenta del 7% e inferiores, y por ello las emisiones de HC después del encendido pueden ser considerablemente inferiores a la estimación basada en la eficiencia de la combustión. Se requerirían mediciones detalladas de las emisiones para proporcionar una estimación más exacta de las emisiones de HC.

6.57 Las emisiones posteriores al encendido se determinan desde el punto de encendido a través de la aceleración hasta marcha lenta. El combustor está quemando combustible; por consiguiente, debe considerarse el régimen de consumo para determinar con exactitud las emisiones. La toma de muestras de gases y partículas en condiciones inferiores a la marcha lenta es muy difícil en los motores debido a que existen considerables volúmenes de combustible no quemado y parcialmente quemado que tienden a contaminar el dispositivo de toma de muestras. Para superar este problema el análisis se realiza utilizando correlaciones de rendimiento de la combustión que han sido determinadas por ensayos de combustores en bancos de prueba en condiciones inferiores a la marcha lenta. Estas correlaciones se basan en la temperatura de admisión al combustor, la presión de la admisión del combustor, el flujo de la masa de aire en el combustor, el flujo de combustible y la relación combustible-aire. Este enfoque para determinar la deficiencia de la combustión y la liberación de calor es común a todos los fabricantes de motores. Como las emisiones de nvPM comenzaron a medirse hace poco tiempo, todavía queda mucho por saber acerca de las estimaciones de la nvPM en condiciones inferiores a la marcha lenta.

6.58 Se calcula la eficiencia instantánea del combustor y la ineficiencia resultante se asigna como porcentaje del combustible no quemado que representa las emisiones de HC producidas. Aplicando este proceso todo a lo largo de la aceleración hasta la marcha lenta, la suma de las emisiones de HC instantáneas puede utilizarse para proporcionar una estimación conservadora de las emisiones totales de HC posteriores al encendido del motor.

6.59 El ICCAIA ha realizado un análisis detallado de los datos de encendido de motores de General Electric (GE), Rolls Royce (RR), International Aero Engines (IAE) y Pratt & Whitney (P&W) y ha elaborado un método para estimar las emisiones totales del arranque sobre la base del empuje nominal a nivel del mar del motor en cuestión. Los resultados de este estudio se presentaron al WG3 del CAEP en la nota de estudio CAEP8-WG3-CETG-WP06. En dicha nota el ICCAIA recomienda una relación lineal de primer orden sencilla entre HC y el empuje nominal del motor al despegue. La ecuación recomendada es:

$$\text{Emisiones de HC al arranque (gramos)} = \text{empuje nominal de despegue (kN)/2} + 80 \quad \text{Ecuación 3-A1-5}$$

*Nota.— Este análisis se basa en ensayos reales con motores realizados en condiciones moderadas de temperatura de admisión. La metodología para obtener las emisiones de HC al arranque tiene carácter conservador debido a que no tiene en cuenta ninguna emisión de CO durante el arranque. Además, la aplicación de esta metodología a todos los motores puede ser optimista en el caso de motores más antiguos en los que los controles de distribución de combustible no son tan sofisticados. La metodología también considera tiempos típicos para el encendido y tiempos típicos de arranque que en la práctica podrían ser bastante variados y en condiciones muy frías podrían ser más prolongados. Sería razonable afirmar que la incertidumbre de esta metodología es de alrededor  $\pm 50\%$ .*

### Metodología avanzada para el cálculo de NO<sub>x</sub>, CO y THC

6.60 El cálculo de las masas de emisión en el enfoque avanzado utiliza datos adicionales, así como más información y modelos existentes. Como tal, las emisiones de aeronaves son una función ( $f$ ) de los parámetros principales y de las opciones escogidas. Esto resulta en un cálculo basado en la performance que utiliza diversos datos e información adicionales que deberían llevar a un inventario de emisiones más exacto que sea exclusivo del aeropuerto específico y del año de estudio en consideración.

6.61 Para determinar las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO, HC o nvPMmass y nvPMnumber para una combinación específica de aeronave y motor, se puede utilizar la fórmula siguiente. Este método se repite para cada tipo y movimiento de aeronave y motor.

$$E_{ij} = \sum (TIM_{ijk} * 60) * f(FF_{jk}, E_{ijk} \text{ o } Thrust_{jk}, Cond_j, Ne_j) \quad \text{Ecuación 3-A1-6}$$

donde:

- $E_{ij}$  = emisiones totales de contaminante  $i$ . Por ejemplo, NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPMmass (en gramos) o nvPMnumber (en número de partículas), producidas por una aeronave específica  $j$  para un ciclo LTO;
- $E_{ijk}$  = índice de emisión para el contaminante  $i$ . Por ejemplo, NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPMmass (en gramos de contaminante por kilogramo de combustible (g/kg de combustible) o nvPMnumber [en número de partículas por kg de combustible (#/kg de combustible)], en el modo  $k$  (por ejemplo, despegue, ascenso, marcha lenta y enfoque) para cada motor utilizado en la aeronave  $j$ ;
- $FF_{jk}$  = flujo de combustible para el modo  $k$ , en kilogramos por segundo (kg/s), para cada motor utilizado en la aeronave  $j$ ;
- $Thrust_{jk}$  = nivel de empuje para el modo  $k$  para el tipo de aeronave  $j$ ;
- $TIM_{ijk}$  = tiempo en el modo para el modo  $k$ , en minutos, para la aeronave  $j$ ;
- $Ne_j$  = número de motores utilizado en la aeronave  $j$ , considerando el posible uso de menos que todos los motores durante la operación de rodaje; y
- $Cond_j$  = condiciones ambientales (velocidad de avance, altitud, presión, temperatura y humedad) para el movimiento de tipo de aeronave  $j$ .

### Cálculo de emisiones — enfoque sofisticado

#### Parámetros

6.62 Con el enfoque sofisticado, los datos reales y refinados necesarios para el análisis se obtienen a partir de mediciones en tiempo real, información sobre la performance notificada o resultados de complejos modelos computarizados. A un alto nivel, estos datos e información caracterizan la composición real de la flota en términos de tipo de aeronave y combinaciones de motores, TIM, niveles de empuje, flujo de combustible y, posiblemente, condiciones de funcionamiento del combustor para todas las fases de las operaciones basadas en tierra y de despegue. En algunos casos, también se requerirán la corrección de las condiciones del funcionamiento de los motores respecto de las

condiciones de referencia, utilizando métodos aceptados.<sup>8</sup> Además, podría considerarse la aplicación de los parámetros definidos en 6.35 a 6.52 sobre la base de la orientación proporcionada en la Tabla 3-A1-2.

6.63 A continuación se indican los datos y la información normalmente requerida para calcular las emisiones de motores de aeronave utilizando el enfoque sofisticado:

- a) mediciones del TIM para diferentes tipos de aeronave y motor en diferentes condiciones de carga, de ruta y meteorológicas;
- b) medidas de aplicación de inversión de empuje para diferentes tipos de aeronave y motor en diferentes condiciones meteorológicas;
- c) condiciones meteorológicas del aeropuerto, donde la modelización de la performance de aeronave y motor tiene en cuenta la variación de las condiciones meteorológicas;
- d) frecuencia y tipo de ensayos de motor;
- e) frecuencia de las operaciones de remolque de aeronave; y
- f) infraestructura y limitaciones del aeropuerto (por ejemplo, longitud de la pista).

6.64 Análogamente, puede disponerse de datos medidos por los explotadores, incluyendo:

- a) reglajes típicos o reales de los mandos utilizados durante la operación de inversión de empuje;
- b) datos reales de la configuración aeronave/motor;
- c) datos reales del flujo de combustible;
- d) velocidades reales de marcha lenta por tipo de motor;
- e) reglajes típicos o reales de los mandos para aproximación, despegue y ascenso inicial (por ejemplo, procedimientos de despegue con empuje reducido);
- f) perfiles de aproximación y ascenso; y
- g) frecuencia de utilización de un número inferior a la totalidad de los motores en el rodaje.

Estos datos del explotador medidos y reales pueden complementar o sustituir elementos de los datos del modelo.

6.65 Aplicando datos de performance y operacionales reales, pueden calcularse los factores de emisión de los motores utilizando programas como el método BFFM o el método DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt).

### **Metodología de cálculo en el enfoque sofisticado para NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPM<sub>mass</sub> o nvPM<sub>number</sub>**

6.66 Una vez conocidos los valores reales de los factores de emisión de los motores, TIM y flujo de combustible de la flota, se calculan las emisiones en LTO utilizando la misma ecuación empleada en el enfoque avanzado, aunque con valores de ingreso refinado.

---

8. Las fuentes para corregir y obtener estos datos serán las líneas aéreas, los fabricantes de motores; el Anexo 16, Volumen II; SAE AIR1845; BADA; y datos de ETMS, ETFMS y FDR.

$$E_{ij} = \sum (TIM_{jk} * 60) * f(FF_{jk}, E_{ijk} \text{ o } Thrust_{jk}, Cond_j, Ne_j) \quad \text{Ecuación 3-A1-7}$$

donde:

- $E_{ij}$  = emisiones totales de contaminante i [por ejemplo, NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPM<sub>mass</sub> (en gramos) o nvPM<sub>number</sub> (número de partículas)] producido por una aeronave específica j para un ciclo LTO;
- $E_{ijk}$  = índice de emisión para el contaminante i [por ejemplo, NO<sub>x</sub>, CO, HC, nvPM<sub>mass</sub> en gramos por contaminante por kilogramo de combustible (g/kg de combustible) o nvPM<sub>number</sub> (número por kilogramo de combustible (#/kg de combustible)) en el modo k para cada motor utilizado en la aeronave j;
- $FF_{jk}$  = flujo de combustible para el modo k, en kilogramos por segundo (kg/s), para cada motor utilizado en el tipo de aeronave j;
- $Thrust_{jk}$  = nivel de empuje para el modo k para el tipo de aeronave j;
- $TIM_{jk}$  = tiempo en el modo para el modo k, en minutos, para la aeronave j;
- $Ne_j$  = número de motores utilizados en la aeronave j; y
- $Cond_j$  = condiciones ambientales (velocidad de avance, altitud, p, t, h) para el movimiento de tipo de aeronave j.

## 7. EMISIONES DEL GRUPO AUXILIAR DE ENERGÍA

7.1 El grupo auxiliar de energía (APU) es un pequeño motor de turbina de gas acoplado a un generador eléctrico que se utiliza para proporcionar potencia eléctrica y neumática a los sistemas de aeronave cuando se necesite. Normalmente está instalado en el cono de cola de la aeronave, detrás de la mampara de presión posterior, y funciona con keroseno alimentado de los tanques de combustible principales. No todas las aeronaves están equipadas con APU y, aunque su uso en las aeronaves de reacción de la categoría de transporte es actualmente casi universal, algunos turbohélices y reactores de negocios no tienen APU instalado.

### Metodología para el cálculo de las emisiones

7.2 A diferencia de los motores principales de las aeronaves, los APU no están certificados respecto de las emisiones, y los fabricantes por lo general consideran que los datos sobre regímenes de emisión de los APU son información protegida. Como resultado, se dispone públicamente de muy pocos datos que sirvan como base para calcular las emisiones de APU.

7.3 Análisis realizados hasta la fecha no han tenido éxito en elaborar metodologías avanzadas y perfeccionadas que puedan predecir con mayor exactitud las emisiones en materia particulada por los APU. Si los usuarios disponen de más información deberían utilizarla si ello beneficia el estudio. Como resultado, se recomienda el empleo del enfoque simple para calcular las emisiones en materia particulada.

### Enfoque simple

7.4 Si se conoce muy poca información sobre los tipos de aeronave que operan en el aeropuerto en estudio, puede utilizarse el enfoque simple para calcular las emisiones de APU. No obstante, es probable que los resultados

presenten un elevado orden de incertidumbre relacionado con el uso de los APU y sus emisiones. Las emisiones generalizadas de los APU se han hecho públicas. Se recomienda utilizar esta información porque el enfoque simple aplica valores promedio específicos de los motores con carácter protegido obtenidos de los fabricantes de APU.

7.5 Cuando el nivel de detalle sobre la flota de aeronaves no permite utilizar este procedimiento, los valores de la Tabla 3-A1-3 se consideran representativos de las emisiones de APU para cada operación de aeronaves en el aeropuerto en estudio (pueden utilizarse otros valores si se consideran más apropiados).

**Tabla 3-A1-3. Valores representativos de las emisiones de APU para cada operación de aeronaves**

Grupo de aeronave	Corta distancia <sup>9</sup>	Larga distancia
Duración de la operación de APU	45 min	75 min
Consumo de combustible	80 kg	300 kg
Emisiones NO <sub>x</sub>	700 g	2400 g
Emisiones HC	30 g	160 g
Emisiones de CO	310 g	210 g
Emisiones totales de materia particulada en masa (tPMmass)	40 g	50 g
Emisiones de nvPMnumber	5,75E+17 #	3,75E+17 #

7.6 Los valores de consumo de combustible y emisiones proporcionados en la Tabla 3-A1-3 se basan en datos promedio específicos de APU, proporcionados por el fabricante, de carácter reservado y protegido, pero no representan ningún tipo específico de APU. Los tiempos operacionales indicados se basan en los tiempos operacionales promedio experimentados por varias operaciones y no representan necesariamente ninguna operación aeroportuaria específica. Cabe señalar que los tiempos de funcionamientos de los APU varían considerablemente según los distintos aeropuertos debido a varios factores que pueden ser considerablemente distintos de los valores por defecto indicados en la Tabla 3-A1-3. Si se dispone de información sobre tiempos de funcionamiento de APU reales, ya sea de estudios o encuestas o como duraciones máximas debidas a restricciones locales del aeropuerto, entonces el consumo de combustible y las emisiones de los APU pueden ajustarse factoreando los valores de la tabla por la relación de los tiempos de estudio con los valores por defecto señalados.

7.7 Por ejemplo, las emisiones de NO<sub>x</sub> por APU de una aeronave de corta distancia funcionando por 60 minutos se calcularían como sigue:

$$\text{NO}_x \text{ (g/LTO)} = (60 \text{ minutos por LTO}) \times (700 \text{ g/45 minutos}) = 933 \text{ g/LTO.}$$

9. Aunque no hay una definición común de corta distancia y larga distancia, en el contexto de este documento se propone un criterio que relaciona el término con el tipo de aeronave. El grupo de larga distancia comprendería aeronaves capaces de volar distancias máximas de más de 8 000 km (por ejemplo, A330, A340, A380, B747, B767-200ER, B763, B764, B777, B787, IL96). La corta distancia comprendería todas las demás aeronaves.

7.8 Además, se dispone de información distribuida públicamente por el fabricante que muestra combinaciones de aeronave y APU incluyendo EI y regímenes de consumo de combustible promedio en el ciclo de funcionamiento del APU.<sup>10</sup> Estimaciones de la Asociación del Transporte Aéreo (ATA) respecto de tiempo de funcionamiento de APU también están disponibles, sobre la base de un estudio limitado e informal relativo al uso de estos equipos. El empleo de los datos sobre emisiones de APU facilitados por el fabricante, conjuntamente con las estimaciones de los tiempos de funcionamiento de APU de la ATA, pueden proporcionar una estimación más exacta de las emisiones totales. Las estimaciones de tiempo de funcionamiento de APU de la ATA proporcionan valores para aeronaves de fuselaje estrecho y ancho<sup>11</sup> con y sin suministro de energía eléctrica en la puerta. Como ejemplos, en la Tabla 3-A1-4 se proporcionan estas estimaciones (pueden utilizarse otros valores si se consideran más apropiados).

**Tabla 3-A1-4. Estimaciones de los tiempos de funcionamiento de APU de la ATA para aeronaves de fuselaje estrecho y ancho**

Tipo de aeronave	Tiempo de funcionamiento (horas/ciclo) de ATA	
	Con energía eléctrica de puerta	Sin energía eléctrica de puerta
Fuselaje estrecho	0,23 a 0,26	0,87
Fuselaje ancho	0,23 a 0,26	1,0 a 1,5

7.9 En el informe técnico de la FAA de 1995 *Technical Data to Support FAA Advisory Circular on Reducing Emissions from Commercial Aviation* (FAA, 1995) figuran combinaciones de APU y aeronave. Este documento proporciona un resumen exacto sobre el tipo de familia de APU importante que se utiliza en diferentes aeronaves. El documento también proporciona EI y flujo de combustible modales para APU específicos, todos los cuales proporcionarían detalles adicionales para el cálculo de las emisiones de esos grupos.

7.10 Por ejemplo, las emisiones de NO<sub>x</sub> de un APU para una aeronave de fuselaje ancho que utiliza un 331-200ER sin energía eléctrica de puerta, donde el tiempo en la carga es 1,5 horas, el EI de NO<sub>x</sub> es 9,51 lb por 1 000 lb de combustible, y el flujo de combustible es de 267,92 lb por hora se calcularía como sigue:

$$\text{NO}_x \text{ (lb/LTO)} = (1,5 \text{ horas por LTO}) \times (9,51 \text{ lb/1 000 lb de combustible}) * (267,92 \text{ lb combustible/hora}) = 3.82 \text{ lb/LTO} = 3\ 466 \text{ g/LTO}.$$

**Enfoque avanzado**

7.11 Las emisiones de los APU pueden estimarse a partir del conocimiento de la combinación real de aeronave/APU y de tiempo de funcionamiento del APU, con EI asignados a cada tipo de APU. Las emisiones pueden calcularse en tres condiciones de carga de funcionamiento de APU sugeridas a saber:

- a) arranque (sin carga);
- b) funcionamiento normal [sistema de control ambiental (ECS) al máximo]; y
- c) carga elevada (arranque del motor principal),

que representan el ciclo de funcionamiento de estos motores.

10. Correspondencia de Honeywell Engines & Systems a la División de Evaluación y Normas de la EPA de los Estados Unidos, emisiones de APU, 29 de septiembre de 2000.

11. Fuselaje estrecho: aeronave con pasillo único. Fuselaje ancho: aeronave con dos pasillos (por ejemplo, A300, A330, A340, A380, B747, B767, B777, B787).



7.12 Para cada una de estas cargas, pueden calcularse las emisiones a partir de las fórmulas siguientes:

NO<sub>x</sub> = régimen de NO<sub>x</sub> x tiempo en la carga;  
 HC = régimen de HC x tiempo en la carga;  
 CO = régimen de CO x tiempo en la carga;  
 tPMmass = régimen de tPMmass x tiempo en la carga; y  
 nvPMnumber = régimen de nvPMnumber x tiempo en la carga.

7.13 Cuando los datos de tiempo y carga reales no puedan identificarse con exactitud, se proporcionan los tiempos de la Tabla 3-A1-5 con carácter de ejemplo (pueden utilizarse otros valores si se consideran más apropiados).

**Tabla 3-A1-5. Ejemplos de tiempo real en la carga**

Actividad	Modo	Aeronaves bimotores	Aeronaves de cuatro motores
Arranque y estabilización de APU	Arranque	3 minutos	3 minutos
Preparación de la aeronave, tripulación y pasajeros embarcando	Funcionamiento normal	Tiempo del funcionamiento total antes de la salida — 3,6 minutos	Tiempo del funcionamiento total antes de la salida — 5,3 minutos
Arranque del motor principal	Carga elevada	35 segundos	140 segundos
Desembarque de pasajeros y apagado de los motores	Funcionamiento normal	15 minutos (por defecto) o según se mida	15 minutos (por defecto) o según se mida

7.14 Para calcular las emisiones de los APU se han asignado los tipos de aeronave actuales a uno de seis grupos que caracterizan sus emisiones (véanse las Tablas 3-A1-6 a 3-A1-11). Entonces pueden calcularse las emisiones de APU de combustible/CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC y CO multiplicando el tiempo en la carga por el factor de emisión apropiado obtenido de estas tablas (pueden utilizarse otros valores si se consideran más apropiados).

7.15 Las emisiones de los APU totales de NO<sub>x</sub>, HC y CO para cada ciclo de escala pueden calcularse a partir de la suma de las emisiones correspondientes a cada modo en la totalidad del ciclo.

**Tabla 3-A1-6. Grupo de combustible de APU**

Grupo de combustible de APU	Arranque sin carga (kg/h)	Funcionamiento normal ECS máximo (kg/h)	Carga elevada Arranque de motor principal (kg/h)
Reactores de negocios/regionales (asientos < 100)	68	101	110
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más nuevos	77	110	130
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más antiguos	69	122	130
Alcance medio (200 ≤ asientos < 300), todos los tipos	108	164	191
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más antiguos	106	202	214
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más nuevos	146	238	262

**Tabla 3-A1-7. Grupo de NO<sub>x</sub> de APU**

Grupo de NO <sub>x</sub> de APU	Arranque sin carga (kg/h)	Funcionamiento normal ECS máximo (kg/h)	Carga elevada Arranque de motor principal (kg/h)
Reactores de negocios/regionales (asientos < 100)	0,274	0,700	0,714
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más nuevos	0,384	0,702	1,128
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más antiguos	0,329	0,733	0,826
Alcance medio (200 ≤ asientos < 300), todos los tipos	0,876	1,556	1,889
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más antiguos	0,757	1,847	2,103
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más nuevos	1,062	2,955	3,347

**Tabla 3-A1-8. Grupo de HC de APU**

Grupo de HC de APU	Arranque sin carga (kg/h)	Funcionamiento normal ECS máximo (kg/h)	Carga elevada Arranque de motor principal (kg/h)
Reactores de negocios/regionales (asientos < 100)	1,026	0,027	0,049
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más nuevos	0,763	0,043	0,035
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más antiguos	0,125	0,040	0,035
Alcance medio (200 ≤ asientos < 300), todos los tipos	0,108	0,018	0,020
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más antiguos	0,113	0,048	0,042
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más nuevos	0,093	0,031	0,030

**Tabla 3-A1-9. Grupo de CO de APU**

Grupo de CO de APU	Arranque sin carga (kg/h)	Funcionamiento normal ECS máximo (kg/h)	Carga elevada Arranque de motor principal (kg/h)
Reactores de negocios/regionales (asientos < 100)	3,345	0,615	0,655
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más nuevos	2,948	0,386	0,543
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más antiguos	1,477	0,927	0,736
Alcance medio (200 ≤ asientos < 300), todos los tipos	1,446	0,230	0,170
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más antiguos	1,476	0,331	0,257
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más nuevos	1,349	0,152	0,173

**Tabla 3-A1-10. Grupo de tPMmass de APU**

Grupo de tPMmass de APU	Arranque sin carga (kg/h)	Funcionamiento normal ECS máximo (kg/h)	Carga elevada Arranque de motor principal (kg/h)
Reactores de negocios/regionales (asientos < 100)	0,063	0,035	0,036
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más nuevos	0,057	0,022	0,021
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más antiguos	0,048	0,056	0,047
Alcance medio (200 ≤ asientos < 300), todos los tipos	0,031	0,038	0,041
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más antiguos	0,070	0,117	0,127
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más nuevos	0,022	0,025	0,023

**Tabla 3-A1-11. Grupo de nvPMnumber de APU**

Grupo de tPMmass de APU	Arranque sin carga (kg/h)	Funcionamiento normal ECS máximo (kg/h)	Carga elevada Arranque de motor principal (kg/h)
Reactores de negocios/regionales (asientos < 100)	8,45E+15	2,00E+17	2,66E+17
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más nuevos	3,65E+16	9,48E+16	1,14E+17
Tipos más pequeños (100 ≤ asientos < 200), más antiguos	1,20E+18	1,06E+18	9,53E+17
Alcance medio (200 ≤ asientos < 300), todos los tipos	2,86E+17	3,49E+17	3,35E+17
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más antiguos	2,11E+17	7,34E+17	1,18E+18
Tipos más grandes (300 ≤ asientos), más nuevos	5,80E+16	2,04E+17	8,22E+16

### Enfoque sofisticado

7.16 El enfoque sofisticado exige conocer en detalle el tipo de APU, sus modos de funcionamiento y el tiempo en esos modos, operaciones de aeronaves y consumo de combustible, así como los factores de emisión correspondientes. Según se señaló, muchos de estos valores pueden no estar disponibles públicamente y debería recurrirse a los fabricantes de APU. Los datos de TIM son otro factor que debería investigarse y recopilarse cuidadosamente. Puede ser que sólo se disponga de valores indicativos para tipos de explotadores y aeronaves específicos y, en este caso, puede ser necesario utilizar los valores por defecto del enfoque avanzado, pero en conjunción con EI más exactos obtenidos del fabricante para lograr un resultado más fiable.

7.17 Las emisiones de los APU para cada modo de funcionamiento de APU de aeronave pueden calcularse entonces a partir de la fórmula siguiente:

$$\text{masa de emisiones} = \text{TIM} \times \text{flujo de combustible} \times \text{EI, para cada modo y cada especie de emisión} \quad \text{Ecuación 3-A1-8}$$

7.18 Entonces puede calcularse la masa de cada especie de emisiones para cada operación sumando las masas de emisiones correspondientes a las diferentes cargas de potencia. Finalmente, sumando todas las emisiones calculadas para cada operación de APU de aeronave, puede calcularse la masa total de cada especie de emisiones para el inventario de emisiones.

7.19 Los fabricantes han comunicado índices de emisión para los APU a algunos explotadores aeroportuarios y de aeronaves; no obstante, debido al carácter reservado y protegido de los datos, no se ha autorizado su uso extendido. Como resultado, el enfoque sofisticado puede estar disponible solamente para unos pocos creadores de inventarios especializados.

-----



## Adjunto B al Apéndice 1

### ÍNDICES DE EMISIÓN DE LAS AERONAVES SIMPLIFICADOS

Tabla B-1. Factor de emisión de LTO por aeronave

Aeronave <sup>1</sup>		Factores de emisión LTO/avión (kg/LTO/aeronave y #LTO/aeronave) <sup>2</sup>							Consumo de combustible (kg/LTO/aeronave)
		CO <sub>2</sub> <sup>3</sup>	HC	NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub> <sup>4</sup>	tPM <sub>mass</sub>	nvPM <sub>number</sub>	
Grandes aeronaves comerciales <sup>5</sup>	A300	5 445	1,25	25,86	14,80	0,86	0,16	1,58E+18	1 723
	A310	4 761	6,30	19,46	28,30	0,75	0,17	9,99E+17	1 507
	A318	2 274	0,91	6,76	12,14	0,36	0,07	5,48E+17	719
	A319	2 390	1,20	8,70	7,86	0,38	0,14	2,54E+18	756
	A320	2 665	0,34	9,90	8,14	0,42	0,17	3,28E+18	843
	A320neo	1 981	0,10	5,95	6,95	0,31	0,04	2,35E+17	627
	A321	3 195	0,17	16,23	5,81	0,51	0,23	4,62E+18	1 011
	A321neo	2 373	0,09	10,76	6,94	0,38	0,06	2,86E+17	751
	A330-200/300	7 052	1,28	35,57	16,20	1,12	0,21	2,42E+18	2 232
	A340-200	6 111	4,05	31,08	25,75	0,97	0,18	8,18E+17	1 934
	A340-300	6 383	3,90	34,81	25,23	1,01	0,19	8,77E+17	2 020
	A340-500/600	10 659	0,14	64,45	15,31	1,69	0,19	7,95E+17	3 373
	A350-900	6 756	0,94	39,81	20,27	1,07	0,20	2,63E+18	2 138
	A350-1000	7 851	0,90	56,91	20,23	1,24	0,24	2,77E+18	2 484
	A380	11 952	3,70	69,42	39,06	1,89	0,34	3,37E + 18	3 782
	707	5 890	97,45	10,96	92,37	0,93	2,15	1,88E+19	1 864
	717	2 143	0,05	6,68	6,78	0,34	0,09	7,80E+17	678
	727-200	4 610	8,14	11,97	27,16	0,73	0,52	1,11E+19	1 459
	737-300/400/500	2 737	1,43	6,98	6,48	0,43	0,14	2,55E+18	866
	737-600	2 279	1,01	7,66	8,65	0,36	0,09	1,23E+18	721
	737-700	2 462	0,86	9,12	8,00	0,39	0,09	1,40E+18	779
	737-800/900	2 784	0,72	12,30	7,07	0,44	0,12	2,04E+18	881
	747-200	11 370	18,24	49,52	79,78	1,80	0,46	3,33E+18	3 598
	747-300	11 074	2,73	65,00	17,84	1,75	0,37	4,01E+18	3 504
	747-400	10 245	2,25	42,88	26,72	1,62	0,24	6,28E+17	3 242
	747-8	11 044	0,84	44,32	27,61	1,75	0,24	2,76E+18	3 495
757-200	4 317	0,22	23,43	8,08	0,68	0,11	1,20E+18	1 366	
757-300	4 625	0,11	17,85	11,62	0,73	0,33	5,88E+18	1 464	

Aeronave <sup>1</sup>		Factores de emisión LTO/avión (kg/LTO/aeronave y #LTO/aeronave) <sup>2</sup>							Consumo de combustible (kg/LTO/aeronave)
		CO <sub>2</sub> <sup>3</sup>	HC	NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub> <sup>4</sup>	tPM <sub>mass</sub>	nvPM <sub>number</sub>	
	767-200	4 622	3,32	23,76	14,80	0,73	0,18	1,04E+18	1 463
	767-300	5 608	1,19	28,19	14,47	0,89	0,17	1,68E+18	1 775
	767-400	5 522	0,98	24,80	12,37	0,87	0,13	3,74E+17	1 748
	777-200/300	7 197	1,35	37,47	16,60	1,14	0,18	1,14E+18	2 277
	787-8	5 468	0,24	28,75	10,34	0,87	0,12	1,15E+18	1 730
	CS 100/A220-100	1 890	0,06	8,25	3,44	0,30	0,05	5,34E+17	598
	CS 300/A220-300	1 890	0,06	8,25	3,44	0,30	0,05	5,34E+17	598
	EMB170	1 589	0,04	4,84	4,05	0,25	0,03	1,01E+17	503
	EMB190	2 059	1,14	6,43	12,13	0,33	0,06	1,87E+17	652
	DC-10	7 287	2,37	35,65	20,59	1,15	0,24	1,26E+18	2 306
	DC-8-50/60/70	5 357	1,51	15,62	26,31	0,85	0,14	1,46E+18	1 695
	DC-9	2 646	4,63	6,16	16,29	0,42	0,29	6,18E+18	837
Grandes aeronaves comerciales <sup>5</sup> Fuente: OACI (2018) <sup>6</sup> ICCAIA (2014) ICCAIA (2018)	MD-11	7 287	2,37	35,65	20,59	1,15	0,24	1,26E+18	2 306
	MD-80	3 184	1,87	11,97	6,46	0,50	0,27	5,76E+18	1 008
	MD-90	2 759	0,06	10,76	5,53	0,44	0,26	5,93E+18	873
	TU-134	2 931	17,98	8,68	27,98	0,46	0,66	1,24E+19	928
	TU-154-M	5 959	13,17	12,00	82,88	0,94	1,11	2,96E+19	1 886
	TU-154-B	7 030	119,03	14,33	143,05	1,11	1,58	1,96E+19	2 225
Reactores regionales/ reactores de negocios empuje > 26,7 kN	RJ-RJ85	1 906	1,35	4,34	11,21	0,30	0,09	2,09E+18	603
	BAE 146	1 801	1,41	4,07	11,18	0,29	0,07	8,26E+17	570
	CRJ-100ER	1 056	0,63	2,27	6,70	0,17	0,04	5,16E+17	334
	CRJ-900	1 517	0,04	4,40	4,12	0,24	0,03	7,34E+16	480
	ERJ-145	993	0,56	2,69	6,18	0,16	0,02	1,81E+17	314
	Fokker 100/70/28	2 387	1,43	5,75	13,84	0,38	0,34	9,19E+18	755
	Dornier 328 Jet	868	0,57	2,99	5,35	0,14	0,04	5,56E+17	275
	Gulfstream IV	2 030	0,55	4,99	8,25	0,32	0,07	5,22E+17	642
	Gulfstream V	1 857	0,60	5,70	8,90	0,29	0,13	1,00E+18	588
	Gulfstream VI	1 925	0,80	5,13	11,82	0,30	0,09	6,21E+17	609
	Gulfstream VII-500	1 619	0,01	6,34	3,20	0,26	0,03	6,04E+16	512
	RRJ95-LR	2 147	0,27	5,90	9,21	0,34	0,15	1,04E+18	679
Yak-42M	1 919	1,68	7,11	6,81	0,30	0,09	1,62E+18	607	
Reactores de bajo empuje (Fn < 26,7 kN)	Cessna 525/560	458	1,66	0,28	16,20	0,07	0,05	1,20E+18	145
Turbohélices Fuente: FOI <sup>7</sup>	Beech King Air <sup>8</sup>	241	0,64	0,32	2,99	0,04	0,02	6,51E+17	76
	DHC8-100 <sup>9</sup>	658	0,00	1,55	2,27	0,10	0,07	2,23E+18	208
	ATR72-500 <sup>10</sup>	641	0,29	1,88	2,35	0,10	0,07	2,36E+18	203

Notas. —

1. Aeronaves equivalentes figuran en la Tabla B-2.
2. La información relativa a las incertidumbres relacionadas con los datos figura en las referencias siguientes:
  - QinetiQ/FST/CR030440 “EC-NEPAir: Work Package 1 Aircraft engine emissions certification — a review of the development of ICAO Anexo 16, Volumen II,” by D.H. Lister and P.D. Norman.
  - Anexo 16, Volumen II, 4ta. edición (2017), de la OACI.
  - Adjunto D al Apéndice 1 de este documento
3. El CO<sub>2</sub> para cada aeronave se basa en 3,16 kg CO<sub>2</sub> producido por cada kg de combustible utilizado.
4. Se supone que el contenido de azufre del combustible es de 0,05 por ciento (misma hipótesis que en la revisión del NGGIP de IPCC de 1996).
5. Los tipos de motor para cada aeronave se seleccionaron sobre la base del motor o los motores más representativo(s) de la flota en cuanto al número de ciclo LTO y/o los niveles promedio de emisiones de los motores, al 30 de septiembre de 2018. Este enfoque, para algunos tipos de motor, puede subestimar o sobreestimar las emisiones de la flota.
6. Banco de datos de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) sobre las emisiones de los escapes de los motores (2004) basado en datos de certificación promedio medidos. Los factores de emisión se aplican solamente al ciclo LTO de certificación. Las emisiones totales y el consumo de combustible se calculan sobre la base del tiempo en el modo y niveles de empuje normalizados de la OACI.
7. Datos no certificados de la base de datos de emisiones en LTO de turbohélice de la FOI (Agencia sueca de investigaciones para la defensa).
8. Representativos de aeronaves turbohélice con potencia en el eje (SHP) de hasta 1 000 SHP/motor.
9. Representativos de aeronaves turbohélice con potencia en el eje de 1 000 a 2 000 SHP/motor.
10. Representativos de aeronaves turbohélice con potencia en el eje de más de 2 000 SHP/motor.



**Tabla B-2. Aeronaves y motores representativos**

Tipo de aeronave genérico	Motor OACI	UID del motor	OACI	Aeronave IATA en el grupo
Airbus A300	PW4158	1PW048	A30B	AB3
			A306	AB4
				AB6
				ABF
				ABX
				ABY
Airbus A310	CF6-80C2A2	1GE016	A310	310
				312
				313
				31F
				31X
				31Y
A318	CFM56-5B9/3	8CM060	A318	318
Airbus A319	CFM56-5B5/P (60%) V2524-A5 (40%)	3CM027 3IA007	A319	319
Airbus A320	CFM56-5B4/3 (50%) V2527-A5 (50%)	8CM055, 11A003	A320	320
				32S
Airbus A320Neo	PW1127G-JM CFM LEAP-1A26	18PW122 17CM082	A20N	320
Airbus A321	CFM56-5B3/3 (30%) V2533-A5 (70%)	8CM054, 3IA008	A321	321
Airbus A321Neo	PW1133G-JM CFM LEAP-1A35	18PW126 17CM083	A21N	321
Airbus A330-200	Trent 772B-60	3RR030	A330	330
			A332	332
Airbus A330-300	Trent 772B-60	3RR030	A330	330
			A333	333
Airbus A340-200	CFM56-5C3	1CM011	A342	342
Airbus A340-300	CFM56-5C4	2CM015	A340	340
			A343	343
Airbus A340-500	Trent 556-61	6RR041	A345	345
Airbus A340-600	Trent 556-61	6RR041	A346	346
Airbus A350-900	Trent XWB-84	14RR079	A350	350
Airbus A350-1000	Trent XWB-97	18RR080	A350	350

Tipo de aeronave genérico	Motor OACI	UID del motor	OACI	Aeronave IATA en el grupo
Airbus A380-8	GP7270 (60%) Trent 970 (40%)	9EA001, 18RR081	A388	380
Boeing 707	JT3D-3B	1PW001	B703	703
				707
				70F
				70M
Boeing 717	BR700-715A1-30	4BR005	B712	717
Boeing 727-100	JT8D-7B	1PW004	B721	721
				72M
Boeing 727-200	JT8D-15	1PW009	B722	722
				727
				72C
				72B
				72F
				72S
Boeing 737-100	JT8D-9A	1PW007	B731	731
Boeing 737-200	JT8D-9A	1PW007	B732	732
				73M
				73X
Boeing 737-300	JT8D-9A	1PW007	B733	737
				73F
				733
				73Y
Boeing 737-400	JT8D-9A	1PW007	B734	737
				734
Boeing 737-500	JT8D-9A	1PW007	B735	737
				735
Boeing 737-600	CFM56-7B20	3CM030	B736	736
Boeing 737-700	CFM56-7B22	3CM031	B737	73G
				73W
Boeing 737-800	CFM56-7B26	3CM033	B738	738
				73H
Boeing 737-900	CFM56-7B26	3CM033	B739	739

Tipo de aeronave genérico	Motor OACI	UID del motor	OACI	Aeronave IATA en el grupo
Boeing 747-100	JT9D-7A	1PW021	B741	74T
			N74S	74L
			B74R	74R
			B74R	74V
Boeing 747-200	JT9D-7Q	1PW025	B742	742
				74C
				74X
Boeing 747-300	JT9D-7R4G2 (66%) RB211-524D4 (34%)	1PW029 (66%) 1RR008 (34%)	B743	743
				74D
Boeing 747-400	CF6-80C2B1F	2GE041	B744	747
				744
				74E
				74F
				74J
				74M
				74Y
Boeing 747-8	GE <sub>nx</sub> 2B67	11GE139	B748	748
Boeing 757-200	RB211-535E4	3RR028	B752	757
				75F
				75M
Boeing 757-300	RB211-535E4B	5RR039	B753	753
Boeing 767-200	CF6-80A2	1GE012	B762	762
				76X
Boeing 767-300	PW4060	1PW043	B763	767
				76F
				763
				76Y
Boeing 767-400	CF6-80C2B8F	3GE058	B764	764
Boeing 777-200	Trent 877	2RR025	B772	777
				772
Boeing 777-300	GE90-115B	7GE099	B773	777
				773
Boeing 787-8	GE <sub>nx</sub> 1B70 Trent 1000 PkgB	11GE138 12RR057	B787	787

Tipo de aeronave genérico	Motor OACI	UID del motor	OACI	Aeronave IATA en el grupo
Airbus A220-100 / Bombardier CS 100	PW 1524G	16PW111	BCS1	CS1
Airbus A220-300 / Bombardier CS 300	PW 1525G	16PW110	BCS3	CS3
Douglas DC-10			DC10	D10
				D11
				D1C
				D1F
Douglas DC-10	CF6-50C2	3GE074	DC10	D1M
				D1X
				D1Y
Douglas DC-8	CFM56-2C1	1CM003	DC85	D8F
			DC86	D8L
			DC87	D8M
				D8Q
				D8T
				D8X
				D8Y
Douglas DC-9	JT8D-7B	1PW004	DC9	DC9
			DC91	D91
			DC92	D92
			DC93	D93
			DC94	D94
			DC95	D95
				D9C
				D9F
	D9X			
Lockheed L-1011	RB211-22B	1RR003	L101	L10
				L11
				L15
				L1F
McDonnell Douglas MD11	CF6-80C2D1F	3GE074	MD11	M11
				M1F
				M1M

Tipo de aeronave genérico	Motor OACI	UID del motor	OACI	Aeronave IATA en el grupo
McDonnell Douglas MD80	JT8D-217C	1PW018	MD80	M80
			MD81	M81
			MD82	M82
			MD83	M83
			MD87	M87
			MD88	MD88
McDonnell Douglas MD90	V2525-D5	1IA002	MD90	M90
Tupolev Tu134	D-30-3	1AA001	T134	TU3
Tupolev Tu154	D-30-KU-154-II NK-8-2U	1AA004 1KK001	T154	TU5
Avro RJ85	LF507-1F, -1H	1TL004	RJ85	AR8
				ARJ
BAe 146	ALF 502R-5	1TL003	B461	141
			B462	142
			B463	143
				146
				14F
				14X
				14Y
				14Z
CRJ-100ER	CF34-3A1	1GE035		CR1
CRJ-900	CF34-8C5	8GE110		CR9
Embraer ERJ145	AE3007A1	6AL007	E145	ER4
				ERJ
Embraer EMB170	CF34-8E5A1	8GE105	E170	E70
Embraer EMB190	CF34-10E5A1	11GE144	E190	E90
Fokker 100/70/28	TAY Mk650-15	1RR021	F100	100
			F70	F70
			F28	F21
				F22
				F23
				F24
F28				

Tipo de aeronave genérico	Motor OACI	UID del motor	OACI	Aeronave IATA en el grupo
BAC 111	Spey-512-14DW	1RR016	BA11	B11
				B12
				B13
				B14
				B15
Dornier Do 328	PW306B	7PW078	D328	D38
Gulfstream IV	Tay 611-8C	11RR048		GRJ
Gulfstream V	BR700-710A1-10	6BR010		GRJ
Gulfstream VI	BR-700-725A1-12	11BR011		
Gulfstream VII-500	PW814GA	19PW127		
RRJ95-LR	SaM146-1S18	11PJ002		
Yakovlev Yak 42	D-36	1ZM001	YK42	YK2
Cessna 525/560	PW545A o similar	FAEED222		
Beech King Air	PT6A-42	PT6A-42		
DHC8-100	PW120 o similar	PW120		DH1
ATR72-500	PW127F o similar	PW127F		AT5

*Nota.— La Tabla B-2 contiene los motores representativos para los modelos de aeronaves indicados; no son necesariamente los más utilizados. Por consiguiente, puede haber diferencias respecto de la Tabla B-1 cuando se calculan las masas de emisiones LTO.*

-----

## Adjunto C al Apéndice 1

### BASES DE DATOS DISPONIBLES AL PÚBLICO PARA COTEJAR TIPO DE AERONAVE CON TIPO DE MOTOR

#### 1. CAMPOS DE DATOS ÚTILES EN LA BASE DE DATOS IOAG

LveTime	=	El tiempo de vuelo se programa al origen de salida en hora local
LveGMT	=	El tiempo de vuelo se programa al origen de salida en hora media de Greenwich (GMT)
ArrCode	=	Número que representa el aeropuerto de llegada
Arrive	=	Código alfabético del aeropuerto de llegada (por ejemplo, JFK)
ArrTime	=	El tiempo de vuelo se programa para la llegada en hora local
ArrGMT	=	El tiempo de vuelo se programa para la llegada en GMT
Equip	=	Tipo de aeronave, en código (por ejemplo, B738)
FAACarr	=	Abreviatura del nombre del transportista
FltNo	=	Número de vuelo
Freq	=	Código 1/0 que indica días de la semana en que el vuelo se efectúa en ese intervalo de tiempo y por par de ciudades
ATACarr	=	Nombre del transportista en el código de la Asociación del Transporte Aéreo (ATA)
IOAGCARR	=	Compañía transportista en el código de dos letras de IOAG
CarrType	=	Compañía de transporte de tercer nivel o transportista
ATAEquip	=	Tipo de aeronave en código de ATA
EqType	=	J para reactor jet, T para turbohélice, P para aeronave de hélice
CarrName	=	Nombre de la compañía transportista completo
LveCity	=	Ciudad de origen y país/Estado, completos
ArrCntry	=	País de destino o Estado si el destino está en Estados Unidos
LveCntry	=	País de origen o Estado si el origen está en Estados Unidos
YYMM	=	Año y mes del horario actual
Eday	=	Código 0/1 que indica si este vuelo se realiza cada día del mes presentado en el horario
FPM	=	Número de veces (días) que este vuelo se realiza entre este par de ciudades a este intervalo de tiempo en un mes

#### 2. CAMPOS DE DATOS ÚTILES EN LA BASE DE DATOS DE REGISTRO DE FLOTA MUNDIAL DE BACK

Tipo de aeronave	Tipo de equipo (código IOAG)	Capacidad de combustible
Número de serie de aeronave	Modelo del equipo de aeronave	Peso máximo de despegue (kg)
Fabricante de aeronave	Categoría de explotador	Carga de pago máxima (kg)
Número de registro/cola	Nombre del explotador	Peso máximo de aterrizaje (kg)
Fabricante del motor	Código IATA del explotador	Autonomía con combustible máximo (km)
Modelo del motor	Código OACI del explotador	Autonomía con carga de pago máxima (km)
Número de motores	Envergadura (m)	
Clase de ruido de aeronave (etapa)	Superficie de ala (metros cuadrados)	
Categoría del equipo	Longitud total (m)	
Tipo de equipo (código LAR)	Volumen de la pansa (metros cúbicos)	

### 3. CAMPO DE DATOS ÚTILES EN LA BASE DE DATOS ASQP

Código de transportista de la IATA	Hora de salida IOAG	Hora de despliegue del tren
Número de vuelo	Hora de salida real	Número de cola de la aeronave
Aeropuerto de salida	Hora de llegada IOAG	Tiempo de rodaje de salida
Aeropuerto de llegada	Hora de llegada CRS	Tiempo de rodaje de entrada
Fecha de la operación	Hora de llegada actual	
Día de la semana	Tiempo con tren replegado	

### 4. CAMPO DE DATOS ÚTILES EN LA BASE DE DATOS DE FLOTAS DE LÍNEAS AÉREAS DE JP

Nombre del explotador	Mes y año de fabricación	Tipo exacto de los motores
Código IATA del explotador	Número de construcción	Peso máximo de despegue (kg)
Código OACI del explotador	Identificación anterior	Configuración de asientos (u otro uso distinto de los servicios de pasajeros)
Número de cola de la aeronave	Número de motores	
Tipo y subtipo de aeronave	Fabricante de los motores	

-----



## Adjunto D al Apéndice 1

# MÉTODO V4.0 DE APROXIMACIÓN DE PRIMER ORDEN PARA ESTIMAR LAS EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA DE LOS MOTORES DE LAS AERONAVES EN MASA Y EN NÚMERO

### 1. NOMENCLATURA

AFR	Relación aire a combustible (base de masa)
BPR	Relación de dilución
C <sub>k</sub>	Concentración en masa estimada de materia particulada no volátil para un motor que opere en modo k, que es una estimación de la masa de partículas no volátiles en una ubicación de instrumentos en el sistema normalizado de medición de la OACI por volumen de flujo normalizado (g/m <sup>3</sup> )
C <sub>r</sub>	Factor de escala unitario para la concentración de nvPM <sub>mass</sub>
D <sub>r</sub>	Factor de escala unitario para el cálculo del diámetro medio geométrico (GMD)
EI	Índice de emisión. Régimen de emisión de contaminantes basado en un kilogramo de combustible consumido. Las unidades de un EI se expresan normalmente como g/kg de combustible. No obstante, con fines de conveniencia en este documento se utiliza la unidad de mg/kg de combustible a menos que se declare explícitamente otra cosa.
EI <sub>Hc</sub>	Índice de combustible del total de hidrocarburos según figura en el EEDB de la OACI (g/kg de combustible)
EI <sub>HCCFM56</sub>	Índice de emisión del total de hidrocarburos para el motor CFM56-2-C5 según figura en el EEDB de la OACI (g/kg de combustible)
EI <sub>nvPM<sub>mass-<u>org</u>CFM56</sub></sub>	Índice de emisión de materia particulada volátil orgánica en masa para el motor CFM56-2-C1 obtenido en las mediciones APEX1 (mg/kg de combustible)
EI <sub>HCEngine</sub>	Índice de emisión del total de hidrocarburos en el EEDB de la OACI para el motor en cuestión (g/kg de combustible)
EI <sub>nvPM<sub>mass</sub></sub>	Índice de emisión de materia particulada no volátil en masa (g/kg de combustible o mg/kg de combustible) en el instrumento
EI <sub>nvPM<sub>mass,e</sub></sub>	Índice de emisión de materia particulada no volátil en masa (g/kg de combustible o mg/kg de combustible) a la salida del motor
EI <sub>nvPM<sub>number,e</sub></sub>	Índice de emisión de materia particulada no volátil en número (#/kg de combustible) a la salida del motor

El <sub>PM<sub>mass</sub></sub>	Índice de emisión total de materia particulada en masa. La suma de los componentes volátiles y no volátiles de la masa (mg/kg de combustible).
El <sub>VP<sub>mass-FSC</sub></sub>	Índice de emisión de materia particulada de sulfato volátil en masa debido a la presencia de azufre en el combustible (mg/kg de combustible)
El <sub>VP<sub>mass-FuelOrganics</sub></sub>	Índice de emisión de materia particulada orgánica volátil en masa debido principalmente a la combustión incompleta del combustible (mg/kg de combustible)
HC	Total de hidrocarburos
FOA	Aproximación de primer orden. FOA4.0 es la más reciente versión de la metodología para proporcionar índices de emisión relativos a la materia particulada emitida de las aeronaves que figuran en el EEDB de la OACI.
F <sub>k</sub>	Empuje del motor estático a nivel del mar en el modo operativo k
F <sub>oo</sub>	Empuje nominal del motor según el EEDB
FSC	Contenido en azufre del combustible (fracción de masa)
GMD <sub>k</sub>	Diámetro medio geométrico de las partículas no volátiles en modo k
K <sub>slm,k</sub>	Factor de corrección de la nvPM en masa por pérdida de partículas en un modo específico
LTO	Ciclo de aterrizaje y despegue de la OACI
MTF	Turbofan mixto
MW <sub>out</sub>	Peso molecular del SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (S <sup>VI</sup> = 96)
MW <sub>Sulphur</sub>	Peso molecular del azufre elemental (S <sup>IV</sup> = 32)
N <sub>r</sub>	Factor de escala unitario para nvPMnumber
nvPM	Materia particulada no volátil. Partículas emitidas que existen en el plano de salida de la tobera de escape del motor de las turbinas de gas y que no se volatilizan cuando se las calienta a una temperatura de 350°C. La nvPM consiste principalmente en carbono negro.
OPR	Relación de presión total
PM	Materia particulada
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
Q <sub>k</sub>	Volumen específico del escape para un motor que opera en modo k, volumen del escape con relación al consumo de combustible (m <sup>3</sup> /kg de combustible)
Q <sub>r</sub>	Factor de escala unitario para un volumen de escape específico
ρ	Densidad efectiva de partículas de nvPM supuesta

$\sigma$	Desviación geométrica estándar supuesta de las distribuciones de tamaño de partículas de nvPM
SF	Factor de escala
SN	Índice de humo. La metodología en este documento se basa en índices de humo definidos en el Apéndice 2 del Anexo 16 de la OACI.
SN <sub>k</sub>	Índice de humo para un motor que opera en modo k. Para LTO normalizado de la OACI, los modos definidos son: despegue, ascenso inicial, aproximación o marcha lenta)
SN <sub>max</sub>	Índice de humo máximo
STP	Temperatura y presión normalizadas. Las STP que se utilizan en este documento son 273,15 grados Kelvin y 1 atmósfera de presión absoluta.
TF	Turbofan no mixto
vPM <sub>mass</sub>	Materia particulada volátil en masa. La vPM <sub>mass</sub> consiste en partículas que se volatilizan cuando se las calienta a una temperatura de 350°C.
tPM <sub>mass</sub>	Materia particulada total en masa. La suma de la nvPM <sub>mass</sub> y la vPM <sub>mass</sub> .
$\epsilon$	Eficiencia de la conversión del azufre en el combustible (fracción de masa)
$\delta_k$	Relación de $EI_{PMvol-FuelOrganics} = \frac{EI_{PMvol-orgCFM56}}{EI_{HCCFM56}}$ obtenida para utilizar en la ecuación D-12 (mg/kg).

## 2. INTRODUCCIÓN

2.1 El FOA4.0 es un método para calcular las emisiones de partículas de los escapes de los motores. Para la concentración en masa de partículas no volátiles y volátiles, los resultados para cada modo de operaciones del motor se indican en forma de índices de emisión (EI) como masa emitida por kilogramo de combustible. Para la concentración en número de partículas no volátiles, los EI correspondientes a cada modo de operación del motor se indican como número de partículas emitidas por kilogramo de combustible. Actualmente, no hay estimaciones disponibles de partículas volátiles en número.

### Materia particulada no volátil (nvPM) (EI<sub>nvPM<sub>mass</sub></sub> y EI<sub>nvPM<sub>number</sub></sub>)

2.2 La estimación de la materia particulada en masa (nvPM<sub>mass</sub>) se basa en el índice de humo (SN) del motor, la relación de aire a combustible (AFR) y, si corresponde, su relación de dilución (BPR). La técnica consiste esencialmente en convertir el SN, mediante una correlación experimental, en una concentración (C) de masa no volátil, que es la masa de PM no volátil por unidad de volumen de escape. Utilizando el AFR y BPR del motor, se calcula el volumen del escape (Q) por kilogramo, luego el producto de C y Q da el EI, con la unidad de masa por kilogramo de combustible consumido.

2.3 La correlación FOA4.0 utilizada para convertir el SN en una concentración de masa no volátil se desarrolló sobre la base de las mediciones semejantes a las que se efectúan para la certificación, y corresponde a una estimación de la concentración en masa en el instrumento, no en el plano de salida del motor. Como las mediciones de materia particulada (PM) resultan afectadas por los mecanismos de pérdida física durante el proceso de toma de la muestra, los valores estimados en el instrumento son más bajos que en el plano de salida del motor. Para los inventarios de emisiones, se necesita una corrección de la pérdida, y la FOA4.0 proporciona una corrección empírica.

2.4 La estimación del  $EI_{nvPMnumber,e}$  [índice de emisión de PM no volátil en número (nvPMnumber) en el plano de salida del motor] se basa en el  $EI_{nvPMmass,e}$  (índice de emisión de nvPMmass en el plano de salida del motor), una estimación del diámetro medio geométrico (GMD), una densidad de partículas supuesta y la distribución del tamaño de las partículas.

2.5 Para la nvPM en masa y en número, los métodos de la FOA4.0 se basan en el método SCOPE11 para calcular las emisiones de carbono negro de las aeronaves (véase la lista de referencias).

2.6 Es necesario calcular el  $EI_{nvPMmass,e}$  y el  $EI_{nvPMnumber,e}$  para los diversos reglajes del empuje del motor que se utilizan en las inmediaciones de los aeropuertos.

#### **$EI_{PMmass-FSC}$ de la PM de sulfato volátil**

2.7 La PM de sulfato volátil se forma a partir del azufre presente en el combustible mediante oxidación del  $SO_2$  ( $S^{IV}$ ) a  $SO_3$  ( $S^{VI}$ ) y subsiguiente hidratación en el penacho de sal de escape, del  $SO_3$  a  $H_2SO_4$ . El EI se calcula a partir del contenido de azufre en el combustible y la relación de conversión de  $S^{IV}$  a  $S^{VI}$  ( $\epsilon$ ). Como tal, el EI no varía con el reglaje de potencia.

#### **$EI_{PMmass-FuelOrganics}$ de la PM orgánica volátil**

2.8 Las mediciones de compuestos orgánicos condensables en el escape de los motores son muy limitadas. Sobre la base de la hipótesis de que los productos orgánicos condensables están directamente relacionados con los hidrocarburos no quemados, se efectúa una estimación juntando el EI de hidrocarburos (HC) notificado por la OACI para el motor con los de otros motores en la base de datos. Mediante una segunda hipótesis de que los motores modernos se comportan en forma similar, la relación de HC puede multiplicarse por el EI de PM orgánica volátil en masa para el motor CFM56-2-C1 que se midió durante el experimento 1 de emisiones de partículas por las aeronaves (APEX1) de la NASA.<sup>1</sup> El resultado es un EI específico del motor y del reglaje de potencia para la PM orgánica volátil.

#### **PM del lubricante del motor**

2.9 No se dispone de datos para permitir la predicción de este EI para PM. Se supone actualmente, sobre la base de resultados de mediciones de APEX1, que el EI actual de la PM orgánica volátil comprende una contribución debida al aceite lubricante.

### **3. FUENTES DE DATOS**

#### **Banco de datos de la OACI sobre las emisiones de los motores (EEDB)**

3.1 Los valores de SN,  $EI_{HC}$  y BPR para los motores figuran en el EEDB de la OACI para los cuatro reglajes de potencia del ciclo de aterrizaje y despegue (LTO). Lamentablemente, en el banco de datos hay omisiones de valores de SN y BPR. Este problema ha sido tratado por el CAEP de la OACI como sigue:

- a) adición de nuevos datos sobre motores;

---

1. NASA. Aircraft Particle Emissions Experiment (APEX), C.C. Wey, U.S. Army Research Laboratory, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, ARL-TR-3903, 2006-214382, septiembre de 2006.

- b) aclaración para turbofan mezclados en cuanto a si las mediciones se efectuaron en el núcleo del motor o en el núcleo y las corrientes de dilución indicando "TF" si el SN informado corresponde al núcleo del motor y "MTF" si el SN informado está diluido por la corriente de aire del fan; y
- c) adición de datos sobre SN faltantes.

3.2 Dado que los datos de SN en el EEDB de la OACI son fragmentarios para muchos motores, y que algunos de ellos muestran solamente el SN máximo, se han elaborado directrices generales para ayudar a rellenar las brechas de datos. Estas directrices se aplican cuando, en vez de un valor de la lista, aparece el símbolo "–" o "NA", lo cual indica que el SN no fue obtenido a ese reglaje de empuje particular o que no se ha notificado dado que sólo se requiere el máximo. Estas directrices fueron elaboradas por Calvert<sup>2</sup> y se basan en el análisis de tendencias modales dentro de grupos de motores para derivar factores de escala que puedan utilizarse para predecir los datos faltantes. Un factor de escala, o de comparación, es una relación de un SN modal y el SN máximo de un motor:

$$SF = \frac{SN_k}{SN_{max}} \quad \text{Ec. D-1}$$

donde:

SF = factor de escala;

SN<sub>k</sub> = SN para uno de los modos k (despegue, ascenso inicial, aproximación o marcha lenta); y

SN<sub>max</sub> = SN máximo.

3.3 Para reducir las incertidumbres en la obtención de los valores de SF, se excluyeron del análisis los SN con valores inferiores a 6. Los valores SF resultantes se presentan en la Tabla D-1. La mayoría de los motores corresponde a la categoría de motores sin doble combustor anular (no DAC); no obstante, los motores Aviadgatel, General Electric CF34, Textron Lycoming y DAC tienen valores SF considerablemente distintos de la norma.

**Tabla D-1. Valores SF sugeridos para predecir SN faltante en el EEDB de la OACI**

Categoría de motor	Despegue	Ascenso inicial	Aproximación	Marcha lenta
Mayoría de motores no DAC	1,0	0,9	0,3	0,3
Motores Aviadgatel	1,0	1,0	0,8	0,3
Motores GE CF34	1,0	0,4	0,3	0,3
Motores Textron Lycoming	1,0	1,0	0,6	0,3
Motores CFM DAC	0,3	0,3	0,3	1,0

3.4 Aplicando estos valores de SF y la ecuación D-1, pueden establecerse los datos SN faltantes si se conoce por lo menos uno de los valores SN modales para un motor.

3.5 También es importante señalar que, además de algunos SN faltantes en el EEDB de la OACI, también existen otras preocupaciones para el cálculo de la nvPM. Si un SN se indica como cero, las estimaciones de FOA4.0 para el E<sub>InvPM<sub>mass</sub></sub> y el E<sub>InvPM<sub>number</sub></sub> serán de más de cero, lo cual es realista, pero los valores serán extremadamente poco fiables.

2. J.W. Calvert, "Revisions to Smoke Number Data in Emissions Data bank," *Gas Turbine Technologies*, QinetiQ, 23 de febrero de 2006.

En algunos casos, el SN para el reglaje de potencia de marcha lenta se indica con un asterisco (\*) como supraíndice. Esto indica que el SN se ha calculado a un reglaje de potencia distinto del 7%. En general, para SN de menos de 3, las estimaciones de nvPM pueden ser muy poco fiables. Finalmente, si el valor está precedido por el símbolo “<”, el valor dado debería utilizarse de todos modos, sabiendo que el resultado probablemente será una sobreestimación (la nomenclatura del EEDB puede modificarse, si es necesario).

### Relación aire-combustible (AFR)

3.6 La AFR no está incluida en el EEDB de la OACI. Este problema se ha superado mediante el uso de AFR promedios de la flota. Estos valores genéricos fueron convenidos con representantes de los tres principales fabricantes de motores y se muestran en la Tabla D-2.

**Tabla D-2. AFR<sub>k</sub> representativas indicadas por reglaje de potencia de la OACI (modo k)**

Reglaje del empuje	AFR
7% (k= marcha lenta)	106
30% (k= aproximación)	83
85% (k= ascenso inicial)	51
100% (k= despegue)	45

### PM de sulfatos volátiles (Elv<sub>PMmass-FSC</sub>)

3.7 El contenido de azufre en el combustible (FSC) puede variar ampliamente entre diferentes entregas de combustible aeronáutico y no se incluye en el EEDB de la OACI. Para aplicación a los inventarios de emisiones de los aeropuertos, este insumo se ha dejado como variable para permitir el uso del valor más aplicable, como el contenido de azufre medio nacional o internacional. Como guía, los valores típicos de FSC varían entre 0,005 a 0,068% del peso<sup>3</sup> con un promedio global de 0,03% del peso<sup>4</sup>. Se recomienda aplicar un valor conservador de 0,068% del peso en ausencia de datos FSC más específicos.

3.8 Existe incertidumbre respecto del proceso de conversión de S<sup>IV</sup> a S<sup>VI</sup>, la producción no lineal de S<sup>VI</sup> que varía con los cambios de FSC y las condiciones de funcionamiento del motor. La variable correspondiente a la eficiencia de la conversión de azufre en el combustible ( $\epsilon$ ) puede ser un dato de entrada directamente por el modelizador si se dispone de información detallada. No obstante, a menudo el valor se desconoce y se recomienda aplicar un valor por defecto en estas situaciones. Sobre la base de las mediciones más recientes de APEX y Partemis,<sup>5</sup> la eficiencia de conversión del azufre puede variar entre 0,5 a más de 3,5% del peso. Se recomienda utilizar como valor por defecto un valor de mediana de 2,4% de peso, sobre la base de las mediciones de APEX. El valor de la eficiencia de conversión del azufre es todavía objeto de investigaciones y se prevén futuros refinamientos.

3. Coordinating Research Council, Inc., *Handbook of Aviation Fuel Properties*, Third Edition, CRC Report No. 635, Alpharetta, GA, U.S.A, 2004

4. IPCC, *La aviación y la atmósfera global*, Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, Cambridge University Press, 1999, ISBN 0 521 66404 7.

5. E. Katragkou et al., “First gaseous Sulphur (VI) measurements in the simulated internal flow of an aircraft gas turbine engine during project PartEmis,” *Geophysical Research Letters*, November 2003, ISSN 0094-8276.

### Aerosoles orgánicos volátiles (El<sub>vPMmass-FuelOrganics</sub>)

3.9 La PM volátil orgánica se calcula a partir de la relación de motor de El<sub>HC</sub> notificada en el EEDB de la OACI siendo el denominador el El<sub>HC</sub> para el motor CFM56-2-C5, que es el valor más cercano al valor medido en el motor durante APEX1.<sup>1</sup> Esta relación se multiplica por el EI de la PM orgánica volátil medido en APEX1 para el motor CFM56-2-C1. En la Tabla D-3 se muestran los valores medidos.

**Tabla D-3. EI volátil medido (de la referencia 1) empleado para calcular la PM orgánica volátil**

Modo k LTO	El <sub>vPMmass-orgCFM56,k</sub> (mg/kg de combustible)
Despegue	4,6
Ascenso inicial	3,8
Aproximación	4,5
Marcha lenta	11,3

## 4. CÁLCULO DEL EI DE PM

### nvPM en masa y en número

4.1 En esta sección se describe el procedimiento para el cálculo del El<sub>nvPMmass,e,k</sub> y del El<sub>nvPMnumber,e,k</sub> de la nvPMmass y la nvPMnumber en el plano de salida del motor para un único modo k de operación del motor.

4.2 En los pasos 1 a 3, se obtiene el El<sub>nvPMmass,e,k</sub> (basado en el índice de humo para un modo específico del motor, SN<sub>k</sub>), y en el paso 4, se obtiene el El<sub>nvPMnumber,e,k</sub> (basado en El<sub>nvPMmass,e,k</sub>).

### Cálculo del El<sub>nvPMmass,e,k</sub> $\left(\frac{g}{kg \text{ combustible}}\right)$

4.3 Se necesita la siguiente información del EEDB: índices de humo para cada motor en operación en modo k (SN<sub>k</sub>); información sobre si los SN corresponden al núcleo del motor (designador de motor "TF" en el EEDB = SN<sub>k</sub> no mixto) o si se han diluido con la corriente de aire (designador "MTF" del EEDB = SN<sub>k</sub> mixto); y BPR, en el caso de SN<sub>k</sub> mixto.

4.4 **Paso 1:** A partir del SN en la operación del motor en modo k, la concentración de nvPM en masa en el instrumento (C<sub>k</sub>) del sistema de medición normalizado de la OACI puede obtenerse utilizando la correlación que se presenta en la ecuación D-2:

$$C_k \left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = \frac{648,4 e^{0,0766 \cdot SN_k}}{1 + e^{-1,098 \cdot (SN_k - 3,064)}} \cdot C_r \quad \text{Ec. D-2}$$

donde C<sub>r</sub> = 1  $\frac{\mu g}{m^3}$

4.5 **Paso 2:** El EI de la nvPMmass en el instrumento ( $EI_{nvPMmass,k}$ ) se obtiene multiplicando  $C_k$  por el volumen específico del escape ( $Q_k$ ) (véase la Ec. D-3), y  $Q_k$  se obtiene mediante la Ec. D-4, donde el valor de  $\beta$  depende de la configuración del escape del motor ( $SN_k$  mixto o no mixto). Los motores con toberas mixtas (“MTF” en el EEDB) requieren de una corrección para BPR, y luego  $\beta = BPR$ . Para todos los demás motores (p. ej., “TF” en el EEDB),  $\beta = 0$ .

$$EI_{nvPMmass,k} \left( \frac{g}{kg \text{ combustible}} \right) = C_k \left( \frac{\mu g}{m^3} \right) \cdot 10^{-6} \cdot Q_k \left( \frac{m^3}{kg \text{ combustible}} \right) \quad \text{Ec. D-3}$$

$$Q_k = (0,777 \cdot AFR_k \cdot (1 + \beta) + 0,767) \cdot Q_r \quad \text{Ec. D-4}$$

donde  $Q_r = 1 \frac{m^3}{kg \text{ combustible}}$

Los valores medios para  $AFR_k$  se indican en la Tabla D-2.

4.6 **Paso 3:** La concentración de nvPMmass en el instrumento ( $C_k$ ) determinada por la Ec. D-2 siempre es más baja que en el plano de salida del motor debido a las pérdidas de partículas en el sistema de muestreo. Para medir las emisiones gaseosas, si se utiliza para tomar la muestra un sistema hermético sin reacciones químicas de las especies gaseosas, la muestra se conservará hasta llegar adonde esté ubicado el instrumento, pero en la medición de partículas, siempre se perderá parte de las partículas (por ejemplo, en las paredes del sistema de toma de muestras). Para la elaboración de inventarios de emisiones, se necesitan los EI de nvPMmass para cada modo del motor en el plano de salida del motor ( $EI_{nvPMmass,e,k}$ ), y requieren de una corrección estimada para la pérdida de partículas dependiente del modo del motor. La pérdida de partículas característica del sistema normalizado OACI de toma de muestras se transfirió a la Ec. D-5.

- a) Utilice el  $C_k$  para calcular el factor de corrección de pérdida para nvPMmass ( $k_{slm,k}$ ) del sistema dependiente del modo a partir de la Ec. D-5:

$$k_{slm,k} = \ln \left( \frac{3,219 \cdot C_k \cdot (1 + \beta) + 312,5}{C_k \cdot (1 + \beta) + 42,6} \right). \quad \text{Ec. D-5}$$

- b) Por último, se calcula  $EI_{nvPMmass,e,k}$  multiplicando  $EI_{nvPMmass,k}$  por  $k_{slm,k}$ :

$$EI_{nvPMmass,e,k} \left( \frac{g}{kg \text{ combustible}} \right) = k_{slm,k} \cdot EI_{nvPMmass,k} \left( \frac{g}{kg \text{ combustible}} \right). \quad \text{Ec. D-6}$$

$$\text{Cálculo de } EI_{nvPMnumber,e,k} \left( \frac{\#}{kg \text{ combustible}} \right)$$

4.7 Para calcular  $EI_{nvPMnumber,e,k}$  es necesario obtener  $EI_{nvPMmass,e,k}$  con la ecuación Ec. D-6 y los diámetros medios geométricos dependientes del modo del motor ( $GMD_k$ ) de las partículas de nvPM, a partir de la Tabla D-4.

**Tabla D-4. Valores normalizados de  $GMD_k$  de la OACI enumerados según reglajes del empuje (Modo k)**

LTO Modo k	$GMD_k$ (nm)
Despegue	40
Ascenso inicial	40
Aproximación	20
Marcha lenta	20



4.8 **Paso 4:** El EI de nvPMnumber en el plano de salida del motor para un único modo de operación del motor k ( $EI_{nvPMnumber,e,k}$ ) se obtiene luego mediante la ecuación D-7:

$$EI_{nvPMnumber,e,k} \left( \frac{\#}{\text{kg combustible}} \right) = \frac{6 \cdot EI_{nvPMmass,e,k} \left( \frac{\text{g}}{\text{kg combustible}} \right) \cdot N_r}{\pi \cdot \rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot GMD_k^3 (\text{nm}^3) \cdot e^{4.5(\ln(\sigma))^2}} \quad \text{Ec. D-7}$$

donde  $\sigma = 1.8$  es la desviación estándar geométrica supuesta de la distribución del tamaño de partículas de nvPM. Luego,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  es la densidad real media supuesta de las partículas de nvPM y  $N_r = 10^{24} \frac{\text{kg} \cdot \text{nm}^3}{\text{g} \cdot \text{m}^3}$  es el factor de escala unitario.

### PM de sulfatos volátiles

4.9 El EI para PM de sulfatos se calcula a partir de:

$$EI_{vPMmass-FSC} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = (10)^6 \left[ \frac{(FSC)(\epsilon)(MW_{out})}{MW_{Azufre}} \right] \cdot S_r \quad \text{Ec. D-8}$$

donde:

$MW_{out} = 96 (\text{SO}_4^{-2})$  y  $MW_{Azufre} = 32$ . Los valores de FSC y  $\epsilon$  son definidos por el usuario con los valores por defecto predefinidos, y  $S_r = 1 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$  es el factor de escala unitario.

### PM orgánica volátil

4.10 El EI de la PM orgánica volátil se calcula a partir de:

$$EI_{PMvolvPMmass-FuelOrganics,k} = \frac{EI_{vPM-orgCFM56,k}}{EI_{HCCFM56,k}} (EI_{HCEngine,k}) \text{ mg/kg} \quad \text{Ec. D-9}$$

donde  $EI_{HCCFM56}$  es el índice de emisión total de hidrocarburos definido por la OACI para el motor CFM56-2-C1.  $EI_{PMvol-orgCFM56}$  es el EI para sustancias orgánicas volátiles medido en APEX1, que se obtiene de la Tabla D-3, y  $EI_{HCEngine}$  es el  $EI_{HC}$  del EEDB de la OACI para el motor en cuestión (el motor cuyo EI se está determinando) correspondiente al modo k. Cabe observar que:

- las unidades de  $EI_{HCEngine}$  y  $EI_{HCCFM56}$  son g/kg de combustible, según se indica en el EEDB de la OACI, y se cancelan; y
- la relación de  $EI_{PMvol-orgCFM56,k}$  y  $EI_{HCCFM56,k}$  es constante para cada modo. Dado que solo cambia el valor modal del  $EI_{HC}$  para el motor en cuestión, puede hacerse una simplificación de la ecuación D-9 que es más fácil de calcular, obteniéndose:

$$EI_{PMvol-FuelOrganics} = (\delta_k) (EI_{HCEngine,k}) \text{ mg/kg} \quad \text{Ec. D-10}$$

donde  $\delta_k$  es una relación constante por modo k. En la Tabla D-5 se presentan los valores de esta constante para cada modo.

**Tabla D-5. Valores modales para la relación de  $EI_{PMvol-orgCFM56}$  y  $EI_{HCCFM56}$  en la ecuación D-10**

LTO Modo k	$\delta$ (mg/g)
Despegue	115
Ascenso inicial	76
Aproximación	56,25
Marcha lenta	6,17

## 5. EJEMPLOS DE CÁLCULO

5.1 Este ejemplo se basa en el cálculo de EI de PM para los motores de la serie JT8D-217, con UID de la OACI de 1PW018. Los valores obtenidos se presentan para todos los modos, mientras que los cálculos completos se muestran solamente para el modo de marcha lenta, dado que el proceso simplemente se repite para los otros modos, utilizando las variables apropiadas. Por supuesto, la PM para el azufre no cambia con el reglaje de potencia y es la misma para todos los modos. En la Tabla D-6 se muestran los datos de  $EI_{HC}$  y SN para el modo en marcha lenta en el EEDB de la OACI correspondiente a este motor.

**Tabla D-6. Datos de la OACI para el motor de la serie JT8D-217, modo en marcha lenta**

Modo LTO	$EI_{HC}$ (g/kg)	SN
Despegue	0,28	13,2
Ascenso	0,43	Faltante
Aproximación	1,6	Faltante
Marcha lenta	3,33	Faltante
Valor máximo	NA	13,3

5.2 Para llenar el valor SN faltante en el modo marcha lenta, se utiliza un factor de escala de 0,3 de la Tabla D-1 correspondiente a “mayoría de motores no-DAC” y el modo k= marcha lenta:

$$SN_{idle} = (0,3)(13,3) = 3,99.$$

5.3 Suponiendo un contenido de azufre en el combustible de 0,068% del peso (fracción 0,00068) y una relación de conversión de  $S^{IV}$  a  $S^{VI}$  del 2,4% del peso (fracción 0,024), se calcula el  $EI_{PMvol-FSC}$  independiente del modo como sigue:

$$EI_{vPMmass-FSC, idle} \text{ (marcha lenta)} = (10^6) \left[ \frac{(0,00068)(0,024)(96)}{32} \right] = 49,0 \text{ mg/kg or } 0,049 \text{ g/kg.}$$

5.4 Puede calcularse el  $EI_{vPM-FuelOrganics}$  utilizando los valores de la Tabla D-3, Tabla D-5 y el  $EI_{HC}$  para el motor específico indicado en el EEDB de la OACI correspondiente al modo en marcha lenta:

$$EI_{PMmass-FuelOrganics, idle} = \frac{11,3}{1,83} (3,33) = 20,6 \text{ mg/kg o } 0,021 \text{ g/kg.}$$

5.5 Otra opción es multiplicar los valores de la Tabla D-5 por el  $EI_{HC}$  para el motor específico según figura en el EEDB de la OACI como:

$$EI_{PM_{mass-FuelOrganics,idle}} = (6,17)(3,33) = 20,5 \text{ mg/kg.}$$

5.6 El motor JT8D-217 es un motor de flujo mixto ("MTF") con una BPR de 1,73, que debe tenerse en cuenta para calcular los EI de nvPM en masa y en número. En resumen, los resultados de los ejemplos de cálculo aplicando el método FOA4.0 al modo en marcha lenta para los motores de la serie JT8D-217 son:

$$EI_{nvPM_{mass,e,idle}} = 0,181 \text{ g/kg} = 181 \text{ mg/kg,}$$

$$EI_{nvPM_{number,e,idle}} = 9,2 \cdot 10^{15} \text{ \#/kg.}$$

5.7 El EI total para todos los componentes de las emisiones de PM en masa es, entonces:

$$EI_{tPM_{mass,idle}} = 181 + 49 + 21 = 251 \text{ mg/kg de combustible o } 0,251 \text{ g/kg de combustible quemado.}$$

5.8 Si bien el EI para el azufre no cambia con el reglaje de potencia, los otros EI deben calcularse para cada modo. En la Tabla D-7 se muestran los resultados para todos los modos. Cabe señalar que se utilizó el SN máximo para las estimaciones del EI de nvPM.

**Tabla D-7. Valores de  $EI_{PM}$  para motores de la serie JT8D-217 (mg/kg de combustible y #kg de combustible)**

Reglaje de potencia definido por la OACI (modo)	$EI_{nvPM_{mass,e,k}}$	$EI_{vPM_{mass-FSC,k}}$	$EI_{vPM_{mass-FuelOrganics,k}}$	$EI_{PM_{mass}} \text{ total por modo } k$	$EI_{nvPM_{number,e,k}}$
Marcha lenta	181	49,0	21	251	$9,2 \cdot 10^{15}$
Aproximación	142	49,0	90	281	$7,2 \cdot 10^{15}$
Ascenso inicial	212	49,0	33	294	$1,3 \cdot 10^{15}$
Despegue	207	49,0	32	288	$1,3 \cdot 10^{15}$

## 6. INCERTIDUMBRES

6.1 Como lo sugiere su título, la FOA4.0 es una aproximación. El grupo ad hoc sobre PM del WG3 del CAEP se ha dedicado a hacer la metodología tan exacta como fuera posible. No obstante, el usuario debe saber que no todos los conceptos físicos están bien comprendidos y los datos para muchos de los parámetros son escasos. Esto conduce a incertidumbres en la metodología de cálculo, entre ellas:

a) falta de datos en el EEDB de la OACI, en particular:

1) en SNk;

b) confiar en los valores promedio de las siguientes características específicas del motor:

1) AFR;

- 2) contenido de azufre en el combustible;
  - 3) factor de conversión de  $S^{IV}$  a  $S^{VI}$ ; y
  - 4) tecnología del combustor y comportamiento del motor individual para la formación de partículas;
- c) datos extremadamente limitados sobre sustancias orgánicas volátiles y falta de convenciones de medición;
- d) ausencia de información sobre el efecto de los lubricantes del motor;
- e) inexactitudes y diferencias en las mediciones de los datos notificados:
- 1) el Anexo 16 estipula que los SN medidos pueden variar en  $\pm 3$ ; y
  - 2) si se indican SN bajos en las fórmulas para el cálculo, las predicciones de  $nvPM_{mass}$  y, a su vez, de  $nvPM_{number}$  pueden resultar muy inexactas;
- f) cabe esperar inexactitudes más altas en la corrección por pérdida de partículas, es decir al convertir los valores estimados en el instrumento de medición a valores estimados en el plano de salida del motor. Es sumamente difícil cuantificar la llamada "corrección por pérdida de partículas del sistema" y solo puede derivarse de modelos físicos; y
- g) el GMD de las partículas de  $nvPM$ , la densidad real de las partículas y la distribución del tamaño de las partículas son supuestos.

6.2 Las limitaciones del EEDB están siendo tratadas por los fabricantes de motores por conducto del WG3 del CAEP. Es improbable que se disponga de valores de la AFR del motor y otros parámetros relacionados con la combustión para tipos de motor individuales debido a que tienen carácter delicado desde el punto de vista comercial. Con más mediciones experimentales y técnicas de medición mejoradas se pondrá tener mayor confianza en el factor de conversión de  $S^{IV}$  a  $S^{VI}$ , compuestos orgánicos volátiles y el efecto de los lubricantes del motor.

6.3 La  $nvPM$  estimada (en masa y en volumen) puede diferir entre un 50% y un 125% para la mayoría de los motores, y quizás significativamente más (órdenes de magnitud) respecto de los valores medidos. Siempre que se disponga de datos de certificación de la  $nvPM$  del motor, deberían usarse esos datos para los inventarios debido a las inexactitudes que pueden resultar de la aplicación de la metodología para calcularlos. Los métodos se ofrecen para calcular las emisiones de PM de toda la flota en los aeropuertos. Como se indica en el párrafo 6.1, los métodos no son apropiados para evaluar las emisiones de PM de motores individuales y poder comparar motores o modos de motor.

6.4 Desde el inicio del proceso FOA y su evolución a FOA3.0 y FOA4.0, la metodología ha continuado evolucionando y la exactitud de la estimación de la PM no volátil ha mejorado. El proceso FOA no es estático y continuará evolucionando a medida que se disponga públicamente de datos de medición de certificación para la  $nvPM$ . Para algunos motores que se encontraban fuera de producción con anterioridad a 2020 y para los cálculos de emisiones de PM volátil, seguirán siendo necesarios los métodos de estimación. Mientras tanto, el CAEP continuará examinando la información disponible para mejorar en la medida posible la metodología y los parámetros utilizados.

-----

## Adjunto E al Apéndice 1

### LISTA DE REFERENCIAS

- Administración Federal de Aviación, Estados Unidos, *Technical Data to Support FAA Advisory Circular on Reducing Emissions from Commercial Aviation*, 1995.
- Agarwal, A. et al., “SCOPE11 Method for Estimating Aircraft Black Carbon Mass and Particle Number Emissions,” *Environmental Science & Technology*, 2019, DOI: 10.1021/acs.est.8b04060.
- Coordinating Research Council, Inc., *Handbook of Aviation Fuel Properties*, Third Edition, CRC Report No. 635, Alpharetta, GA, USA, 2004.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), *La aviación y la atmósfera global*, Cambridge University Press, 1999, ISBN 0 521 66404 7.
- Hagen, D.E. et al., “Particle emissions in the exhaust plume from commercial jet aircraft under cruise conditions,” *Journal of Geophysical Research*, 101(D14), 1996, pp. 19551–19557.
- Kärcher, B. et al., “Particles and Cirrus Clouds (PAZI) — Overview of results 2000–2003,” R. Sausen and G.T. Amanatidis (eds.), in *Proceed. European Workshop Aviation, Aerosols and Climate*, [Air Pollution Research Report No. 83, Commission of the European Communities](#), pp. 197–206.
- NARSTO, *Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment*, P. McMurry, M. Shepherd, and J. Vickery (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, England, 2004, ISBN 0 52 184287 5.
- National Research Council, Committee on Research Priorities for Airborne Particulate Matter, *Research Priorities for Airborne Particulate Matter: I. Immediate Priorities and a Long-Range Research Portfolio*, 1988, <https://www.nap.edu/catalog/6131/research-priorities-for-airborne-particulate-matter-i-immediate-priorities-and> (Junio de 2020).
- National Research Council, Committee on Research Priorities for Airborne Particulate Matter, *Research Priorities for Airborne Particulate Matter: IV. Continuing Research Progress*, 2004, <http://www.nap.edu/catalog/10957.html> (Junio de 2020).
- Petzold, A., and F.P. Schröder, “Jet engine exhaust aerosol characterization,” *Aerosol Science Technology*, 28, 1998, pp. 62–76.
- Petzold, A. et al., “Near-field measurements on contrail properties from fuels with different sulphur content,” *Journal of Geophysical Research*, 102 (D25), 1997, pp. 29867–29880.
- Petzold, A. et al., “Particle emissions from aircraft engines — a survey of the European project PartEmis,” *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 14, No. 4, 2005, pp. 465–476.
- SAE AIR5715, *Procedure for the Calculation of Aircraft Emissions*, 2009, <https://www.sae.org/standards/content/air5715/> (Junio de 2020).

Schumann, U. et al., "In situ observations of particles in jet aircraft exhausts and contrails for different sulphur-containing fuels," *Journal of Geophysical Research*, 101(D3), 1996, pp. 6853–6869.

Schumann, U. et al., "Influence of fuel sulfur on the composition of aircraft exhaust plumes: The experiments SULPHUR 1-7," *Journal of Geophysical Research*, 107 (10.1029/2001JD000813), 2002, pp. AAC 2-1–AAC 2-27.

Whitefield, P.D. et al., NASA/QinetiQ Collaborative Program — Final Report, NASA TM-2002-211900 and ARL-CR-0508, NASA, Washington, D.C., USA, 2002, 193 pp.

### EJEMPLOS DE SISTEMAS DE MODELIZACIÓN

La lista siguiente contiene ejemplos de sistemas de modelización para los estudios de la calidad del aire local en los aeropuertos. La lista no es ni completa ni prescriptiva.

<i>Número y versión</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Sitio web</i>
ADMS	Aplicación, disponible públicamente	<a href="http://www.cerc.co.uk">www.cerc.co.uk</a>
Open ALAQS-AV	Aplicación disponible por intermedio de EUROCONTROL	<a href="http://www.eurocontrol.int">www.eurocontrol.int</a>
AEDT y EDMS 5.1	Aplicación, disponible públicamente	<a href="http://www.faa.gov">www.faa.gov</a>
LASPORT 2.3	Aplicación, disponible públicamente	<a href="http://www.janicke.de">www.janicke.de</a>

-----



## Apéndice 2 del Capítulo 3

# EMISIONES DE LOS SERVICIOS DE ESCALA A LAS AERONAVES

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Los servicios aeroportuarios a las aeronaves durante las escalas operacionales o para mantenimiento constituyen una fuente importante de emisiones relacionadas con los aeropuertos. El tipo y cantidad de vehículos y equipos utilizados para los servicios de escala dependen de varios factores, incluyendo el tamaño y tipo de la aeronave; propiedades y distribución de los puestos de estacionamiento de aeronaves y las características tecnológicas y operacionales del equipo de servicios de escala. En general hay dos tipos de emisiones emitidas por cuatro fuentes distintas en esta categoría: a) equipo auxiliar de tierra (GSE) y emisiones de los vehículos de la parte aeronáutica (emisiones de escapes de motores) y b) reabastecimiento de combustible a las aeronaves y deshielo de las mismas [emisiones de evaporación de compuestos orgánicos volátiles (VOC)]:

a) **Emisiones de escape**

- 1) *Equipo auxiliar de tierra (GSE)*. Emisiones de vehículos y maquinaria utilizados para prestar servicios a las aeronaves en tierra en el puesto de estacionamiento en el área de mantenimiento; y
- 2) *Vehículos de la parte aeronáutica*. Vehículos y maquinaria de servicio que operan en vías de servicio dentro de la propiedad aeroportuaria (distintos del GSE).

b) **Emisiones de evaporación**

- 1) *Reabastecimiento de combustible a las aeronaves*. Emisiones de evaporación de VOC durante el reabastecimiento de combustible; y
- 2) *Deshielo de aeronaves*. Emisiones de evaporación de VOC durante el deshielo de las aeronaves (cuando corresponda).

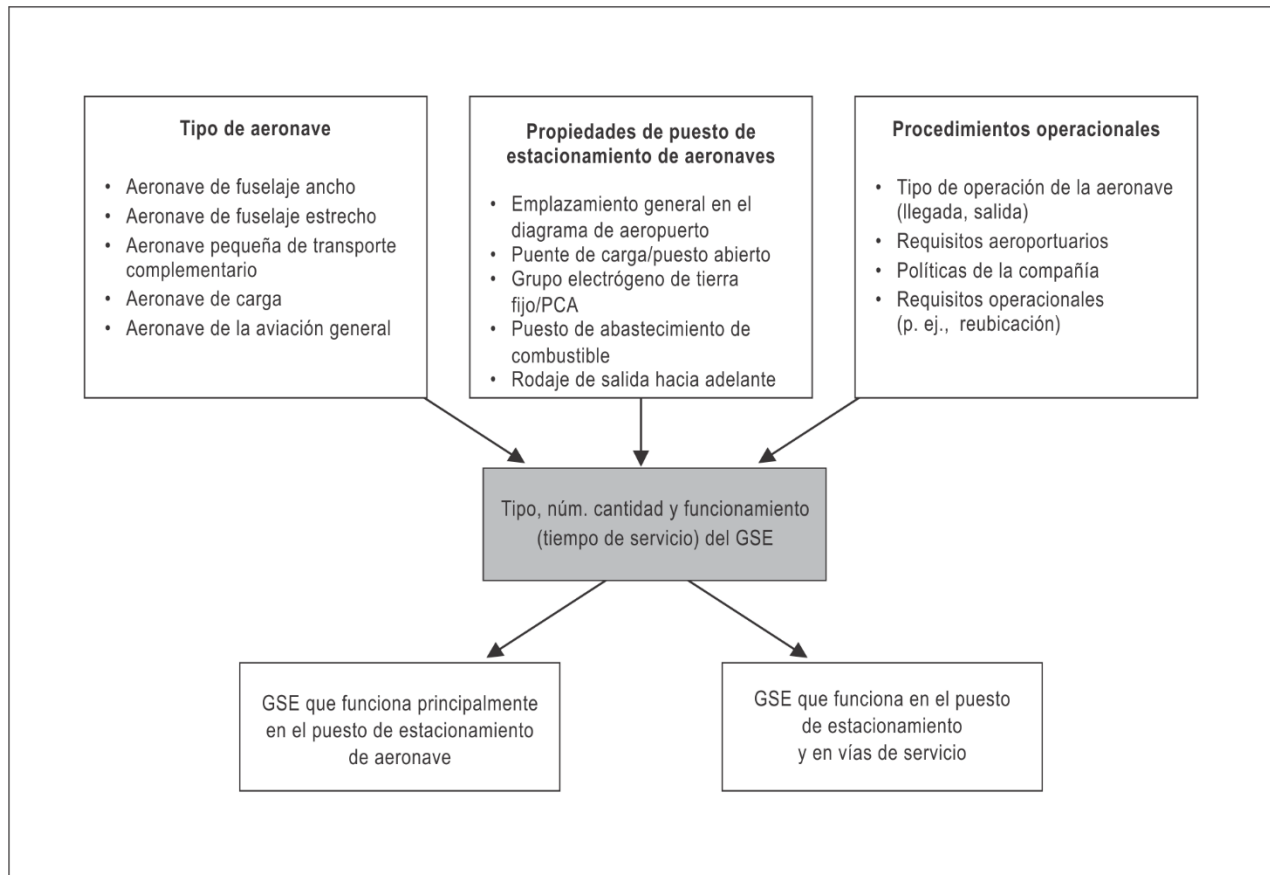
1.2 En el Apéndice 3 del Capítulo 3 se describen las emisiones de abastecimiento de combustible a vehículos, depósito de combustibles y deshielo de superficies.

### 2. EMISIONES DEL EQUIPO AUXILIAR DE TIERRA

#### Operaciones

2.1 La operación de los GSE es una función de varios parámetros que pueden variar considerablemente de aeropuerto en aeropuerto (véase la Figura 3-A2-1). No obstante, en términos de resolución espacial y temporal, las emisiones del GSE pueden relacionarse con las operaciones de aeronaves.





**Figura 3-A2-1. Caracterización de las operaciones de GSE**

2.2 Los GSE suelen ser vehículos que no circulan por las vías de servicio y que han sido especialmente diseñados para proporcionar los servicios requeridos por las aeronaves (por ejemplo, cargadores, correas transportadoras de equipaje, remolcadores de aeronave). Están diseñados para tareas a baja velocidad y de elevada torca y construidos para maniobrar en lugares estrechos entorno de las aeronaves estacionadas. Pueden moverse a través del aeropuerto, pero en general prestan sus servicios en un número limitado de lugares específicos. En general son impulsados por motores de combustión interna de varios tipos, pero a veces se usan otras tecnologías. No obstante, algunas unidades del GSE funcionan en un puesto de estacionamiento de aeronaves durante cierto tiempo y luego regresan a instalaciones específicas por las vías de servicio (por ejemplo, camiones de abastecimiento, camiones para lavabos y aseos, remolcadores de equipaje). También pueden estar equipados con motores de carretera certificados. En la Tabla 3-A2-1 se indican los GSE utilizados con mayor frecuencia para proporcionar servicios de auxiliares de tierra a las aeronaves con valores por defecto sugeridos para motores y tiempos de servicio.

**Tabla 3-A2-1. Equipo auxiliar de tierra típico**

Equipo auxiliar de tierra	Función	Tipo de motor/equipo	Tiempo de servicio por turno	Comentarios
Grupo electrógeno de tierra (GPU)	Proporciona energía eléctrica a las aeronaves	100–150 kW diésel o gasolina; 15%-50% de carga	Depende del horario	El sistema eléctrico puede estar integrado en la puerta/pasarela
Aire acondicionado/ calefacción	Proporciona aire acondicionado y calefacción a las aeronaves	150 kW diésel o gasolina; 50% de carga	Depende del horario de las condiciones meteorológicas	El PCA eléctrico puede estar integrado en la puerta/pasarela
Dispositivo de arranque de aire	Proporciona aire a alta presión para arrancar los motores principales	150 kW diésel; 90% de carga	3–5 minutos	Normalmente no se utiliza si la aeronave está equipada con un APU de a bordo
Tractor de empuje para fuselaje estrecho	Empuje y remolque de mantenimiento	95 kW diésel; 25% de carga	5–10 minutos	Se dispone de vehículos eléctricos
Tractor de empuje para fuselaje ancho	Empuje y remolque de mantenimiento	400 kW diésel; 25% de carga	5–10 minutos	
Escaleras para pasajeros	Proporciona fácil acceso de la rampa	30–65 kW diésel o gasolina; 25% de carga	2–10 minutos	Se dispone de unidades no motorizadas y eléctricas
Cargador de cinta	Transfiere el equipaje entre los carritos y la aeronave	33 kW diésel, gasolina o CNG; 25% de carga	10–50 minutos	Se dispone de unidades eléctricas
Remolcador de equipaje	Remolca los carritos cargados para intercambiar equipaje	30 kW diésel, CNG o gasolina; 50% de carga	10–50 minutos	Se dispone de unidades eléctricas
Cargador de carga y contenedores	Levanta cargas pesadas y contenedores para ayudar a la transferencia	60 kW diésel o gasolina con dispositivos elevadores; 25% de carga	10–50 minutos	Diferentes tipos
Transportadores de carga	Transfieren la carga de las carretillas al cargador	30 kW diésel o gasolina; 25% de carga	10–50 minutos	Diferentes tipos
Camión sin caja o remolque	Remolques varios y servicios pesados	Camión diésel de 90 kW; 25% de carga	Variable	Muy variable
Camión de suministros y servicios de a bordo	Limpieza y reabastecimiento de alimentos y suministros	85–130 kW diésel con elevador de tijera; 10–25% de carga	10–30 minutos	Puede utilizar motores certificados para circulación carretera
Camión para lavabos y agua potable	Vacía los tanques de los sanitarios en la aeronave y reabastece de agua a la misma	120 kW diésel con tanque y bombas; 25% de carga	5–20 minutos	Puede utilizar motores certificados para circulación carretera
Camión con hidrante de combustible	Envía el combustible desde las fosas a la aeronave	70–110 kW diésel con bombas; 10-50% de carga	10–40 minutos	Puede utilizar motores certificados para circulación carretera
Camión cisterna	Bombea el combustible del camión a la aeronave	200 kW diésel con bombas; 10-50% de carga	10–40 minutos	Puede utilizar motores certificados para circulación carretera
Camión de deshielo	Esporce fluido de deshielo sobre las aeronaves antes de la salida	180 kW diésel con tanque, bombas, aspersores; 10–60% de carga	5–15 minutos	Puede utilizar motores certificados para circulación carretera
Elevador de mantenimiento	Proporciona acceso al exterior de las aeronaves	70–120 kW diésel, CNG o gasolina; 25% de carga	Variable, poco utilizado	Puede utilizar motores certificados para circulación carretera
Autobuses de pasajeros	Transportan a los pasajeros hacia y desde las aeronaves	100 kW diésel, CNG o gasolina; 25% de carga	Variable (la distancia más que el tiempo)	Puede utilizar motores certificados para circulación carretera
Elevador de horquilla	Eleva y transporta objetos pesados	30–100 kW diésel; 25% de carga	Muy variable	Se dispone de unidades eléctricas; uso principal relacionado con la carga
Vehículos varios (automóviles, camionetas, camiones)	Servicios varios	50–150 kW diésel, CNG o gasolina; 10–25% de carga	Muy variable (distancia más que el tiempo)	Normalmente con motores certificados para uso carretero

2.3 Según se muestra en la Tabla 3-A2-2, el tamaño de la aeronave influye a veces en la asignación de puestos de estacionamiento y, frecuentemente, en los procedimientos de los servicios de escala (por ejemplo, cantidad, tipos y tiempo de funcionamiento) que involucran al GSE.

**Tabla 3-A2-2. Caracterización de los grupos de aeronaves**

Grupo de aeronave	Caracterización
Aeronaves de fuselaje ancho	Equipaje de pasajeros cargado en contenedores Gran volumen de carga Requieren escaleras de pasajeros con autobuses o pasarela de embarque Los tiempos de escale puede involucrar movimiento de la aeronave (estacionamiento diurno)
Aeronaves de fuselaje estrecho	Equipaje de pasajeros cargado individualmente (por ejemplo, no en un contenedor) Pequeño volumen de carga Requieren escaleras para pasajeros con autobuses o pasarela de embarque Breves tiempos de escala
Pequeñas aeronaves de transporte complementario	Compartimiento para equipaje abierto Transportan alguna carga (volúmenes muy pequeños) Breves tiempos de escala Escalerillas incorporadas para pasajeros
Aeronaves de carga	No necesitan "comodidades" (autobuses, equipaje, aire acondicionado) Equipo y vehículos especializados para manipulación de carga
Aeronaves de la aviación general	No llevan compartimiento de equipaje, carga o escalerillas Actividades de servicios limitadas

2.4 En la mayoría de los aeropuertos, pueden encontrarse los dos siguientes tipos de puestos de estacionamiento de aeronave:

- a) puestos en andén o pasarela en los que un puente de embarque de pasajeros conecta la aeronave con el edificio; y
- b) puestos distantes o abiertos donde la aeronave se estaciona sin conexión directa con el edificio (para operaciones de pasajeros o carga).

2.5 Los puestos en sí pueden exhibir considerables diferencias en términos de ubicación y equipo técnico disponible que influyen en la cantidad y en el funcionamiento del GSE y, por consiguiente, en las emisiones de esta fuente (véase la Tabla 3-A2-3). Los puestos también pueden ser diferentes por razones de uso especializado (por ejemplo, si un puesto se utiliza para las aeronaves de carga o para las aeronaves de pasajeros).

**Tabla 3-A2-3. Propiedades de los puestos de estacionamiento de aeronaves**

Propiedades del puesto	Consecuencias para GSE y operacionales	Notas
Puesto equipado con pasarela de embarque de pasajeros	Las aeronaves no requieren escalerillas para pasajeros	Pueden necesitar aire acondicionado (PCA), calefacción, o GPU
Puesto equipado con 400 Hz fijos	La aeronave no requiere GPU y puede necesitar equipo de aire acondicionado (ACU)	
Equipada además con PCA (estacionaria) o mediante una unidad de climatización de aeronave (ACU)	La aeronave no requiere GPU o ACU	Estacionario solamente en conjunto con 400 Hz
Puesto equipado con cañerías para keroseno	La aeronave no requiere un camión cisterna para reabastecimiento	La aeronave requiere un camión con hidrante de combustible
Diseño adecuado para desconexión motorizada	La aeronave no requiere un tractor de empuje	No es posible en puestos con pasarela

2.6 Los procedimientos operacionales también determinan los tipos y cantidades de servicios de GSE requeridos, según se describe a continuación:

- a) El tipo de GSE utilizado varía ampliamente según las aplicaciones. Por ejemplo, después del aterrizaje de las aeronaves se requieren tipos de GSE diferentes a los utilizados antes de la salida y para prestar servicios a las operaciones de pasajeros y carga.
- b) Los reglamentos gubernamentales (por ejemplo, seguridad, requisitos operacionales) y los requisitos del explotador aeroportuario (por ejemplo, procedimientos o restricciones específicos del aeropuerto) pueden limitar o impedir el uso de ciertos GSE.
- c) El explotador de la línea aérea, en cooperación con el agente de servicios de escala, pueden aplicar procedimientos específicos que influyen en las emisiones del GSE.
- d) La infraestructura aeroportuaria puede afectar la viabilidad de tipos de combustible alternativos u otros factores que pueden afectar las emisiones.
- e) El diseño del puesto de estacionamiento en el aeropuerto y la flexibilidad de las operaciones también pueden ser un factor (reubicación de GSE de puesto a puesto o a puestos alejados durante las operaciones).

2.7 Los datos operacionales pueden obtenerse en diferentes formas (por ejemplo, de abajo arriba, evaluando piezas individuales de GSE, o de arriba abajo, utilizando tiempos totales de funcionamiento o consumo de combustible en la población total de GSE). Cada alternativa proporciona ventajas y la elección entre ellas dependerá de factores como la finalidad y el diseño del inventario de emisiones, la disponibilidad de datos y su exactitud. Los datos operacionales podrían comprender:

- a) consumo de combustible total por todos los GSE (por diferentes tipos de combustible);

- b) número total de horas de funcionamiento para cada tipo de GSE y número de unidades por tipo (nuevamente, distinguiendo por tipo de combustible); y
- c) tiempo de funcionamiento de cada unidad de GSE para operaciones de aeronaves específicas o individuales (por ejemplo, LTO en general o llegada y salida por separado). También podría incluirse información especial y temporal. La exactitud del tiempo de servicio del GSE en este caso es muy importante porque incluso pequeñas desviaciones pueden llevar a grandes errores. Por ejemplo, si un remolcador se utiliza 8 minutos por ciclo (en vez de 6 minutos) y los ciclos de servicios de escala son 25 000, el error sería de 843 horas de funcionamiento.

### **Factores de emisión**

2.8 Los factores de emisión para GSE no son uniformes para todas las regiones del mundo. Dependiendo de las normas regionales o nacionales o de los requisitos operacionales locales, el mismo tipo de equipo puede tener motores diferentes (por ejemplo, tamaño y tecnología). Los factores de emisión también se notifican a menudo como factores de emisión de vehículos no carreteros o maquinaria móvil no carretera. Dependen del tipo de combustible, tamaño del motor, factor de carga, tecnología, edad (o factor de deterioro) y dispositivos adicionales para reducción de emisiones. Se recomienda que los analistas obtengan primero datos específicos de la industria o consulten con las autoridades adecuadas si existen otros factores de emisión disponibles, si no se pueden conseguir de otra forma.

### **Cálculo de las emisiones**

2.9 El cálculo de las emisiones de GSE puede efectuarse aplicando cualquiera de los dos siguientes enfoques simple, así como los enfoques avanzado y sofisticado.

#### ***Enfoque simple primario***

2.10 Por medio de un método muy simple aplicando el enfoque basado en la aeronave, pueden calcularse las emisiones utilizando el número de llegadas, salidas, o ambos, de las aeronaves y los factores de emisión por defecto. Con este enfoque, no es necesario realizar análisis de la flota de GSE y el funcionamiento del equipo. En la Tabla 3-A2-4 se presentan ejemplos de factores de emisión representativos del aeropuerto de Zúrich en Suiza y que podrían utilizarse para este enfoque. Debido a que el equipo de servicios de escala a las aeronaves varía según el Estado, el aeropuerto y el explotador de aeronave, debería realizarse un análisis aplicando factores de emisión apropiados a la flota de GSE que se está evaluando.

**Tabla 3-A2-4. Ejemplo de factores de emisión por defecto representativos del aeropuerto de Zúrich para servicios de escala a las aeronaves<sup>1</sup>**

Contaminante	Unidad	Tecnología GSE 1990–2005		Tecnología GSE 2000–2015	
		Aeronave de fuselaje estrecho (reactor de ala fija y pasillo único)	Aeronave de fuselaje ancho (reactor de ala fija de dos pasillos)	Aeronave de fuselaje estrecho (reactor de ala fija y pasillo único)	Aeronave de fuselaje ancho (reactor de ala fija de dos pasillos)
NO <sub>x</sub>	kg/ciclo	0,400	0,900	0,260	0,510
HC	kg/ciclo	0,040	0,070	0,020	0,045
CO	kg/ciclo	0,150	0,300	0,100	0,225
PM <sub>10</sub>	kg/ciclo	0,025	0,055	0,015	0,030
nvPM	#/ciclo	n/a	n/a	4,0E+13	1,1E+14
CO <sub>2</sub>	kg/ciclo	18	58	20	48

2.11 Para esta aplicación, las emisiones se calculan multiplicando el número de movimientos (por categoría de aeronave o total si no se dispone de diferenciación) por el respectivo factor de emisión (o el promedio de ambos factores si no se dispone de diferenciación de aeronaves).

2.12 Por ejemplo, en un aeropuerto con 23 450 movimientos de aeronaves de fuselaje estrecho y 9 600 movimientos de aeronave de fuselaje ancho y factores de emisión de NO<sub>x</sub> supuestos de 0,4 kg/ciclo y 0,9 kg/ciclo, la cantidad total de NO<sub>x</sub> es:

$$0,4 \text{ kg/ciclo} * (23\ 450 \text{ movimientos}) [\text{fuselaje estrecho}] + 0,9 \text{ kg/ciclo} *(9\ 600 \text{ movimientos}) [\text{fuselaje ancho}] = 9\ 010 \text{ kg NO}_x.$$

### **Enfoque simple secundario**

2.13 Otro método más simplificado entraña el uso del combustible por el GSE. En este enfoque, las emisiones se calculan obteniendo datos reales del uso de combustible para el GSE (o estimando dichos datos) y luego combinándolas con los factores de emisión promedio, independientemente del número, tamaño o tecnología del equipo. En la Tabla 3-A2-5 se presentan ejemplos de factores de emisión representativos de Europa que podrían utilizarse para este enfoque. Debido a que el equipo de servicios de escala de las aeronaves varía según el Estado, el aeropuerto y el explotador de la aeronave, el análisis debería realizarse utilizando factores de emisión apropiados para la flota de GSE que se está evaluando.

$$\text{Emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g}] = \sum \text{tipos de combustible} (\text{tipo de combustible total utilizado} [\text{kg}] \times \text{factor de emisión promedio} [\text{g/kg tipo de combustible}]) \quad \text{Ec. 3-A2-1}$$

1. Flughafen Zürich AG), 2006 y 2014, actualización parcial en 2017 (incluye una mezcla de combustibles compuesta por gasolina, diésel, CNG y electricidad).

**Tabla 3-A2-5. Ejemplo de factores de emisión europeos para servicios de escala a las aeronaves<sup>2</sup>**

Contaminante	Diésel (g/kg)	Gasolina (g/kg)
NO <sub>x</sub>	32,8	7,1
HC	3,4	17,6
CO	10,7	770,4
PM	2,1	0,1
CO <sub>2</sub>	3 160	3 197

2.14 Por ejemplo: si el volumen total de combustible diésel utilizado para el GSE es 128 500 kg, y se supone un factor de emisión promedio de 48,2 g NO<sub>x</sub>/kg de combustible, el volumen total de las emisiones de NO<sub>x</sub> es 6 194 kg.

### Enfoque avanzado

2.15 Con este enfoque, se calculan las emisiones de toda la población de GSE en su totalidad o individualmente según los requisitos de GSE específicos de la aeronave. En ambos casos, se utiliza el tiempo de funcionamiento real o el consumo de combustible durante un período de tiempo definido (por ejemplo, un año) para cada tipo de GSE. Para aplicar este método de cálculo, es necesario obtener o estimar la población de la flota de GSE por categoría y actividad conexas (horas/año, consumo de combustible/año) para cada parte del GSE. Hay dos alternativas que utilizan el consumo total de combustible o el tiempo total de funcionamiento en horas sobre la población de un determinado modelo de GSE. Cuando se utilizan las horas totales de funcionamiento, las emisiones pueden calcularse utilizando un flujo de combustible específico o el tamaño y factor de carga del modelo GSE. También puede considerarse un factor de deterioro, si se dispone de éste.

$$\text{Emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g/GSE}] = \text{flujo de combustible} [\text{kg/h}] \times \text{factor de emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g/kg de combustible}] \times \text{tiempo} [\text{h}] (\times \text{DF}) \quad \text{Ec. 3-A2-2}$$

o

$$\text{Emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g/GSE}] = \text{potencia} [\text{kW}] \times \text{carga} [\%] \times \text{factor de emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g/kW}] \times \text{tiempo} [\text{h}] (\times \text{DF}) \quad \text{Ec. 3-A2-3}$$

o

$$\text{Emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g/GSE}] = \text{flujo de combustible} [\text{kg/a}] \times \text{factor de emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g/kg de combustible}] (\times \text{DF}) \quad \text{Ec. 3-A2-4}$$

donde:

potencia = tamaño del motor (kW, a veces bhp);

factor de emisión = basado en el tipo de motor, tipo de combustible, edad, y reflejando la tecnología de diseño y control de emisiones del GSE;

tiempo [h] = tiempo total anual de funcionamiento; y

DF = factor de deterioro.

2. Diésel y gasolina: *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013*, 1.A.4.a.ii (Guía de inventario de emisiones de contaminantes del aire de 2013 de EMEP/EEA) (Pueden usarse otros valores si se consideran más apropiados).

2.16 Para esta aplicación, las emisiones del GSE se suman para todas las partes individuales de un tipo de equipo específico y para toda la población de GSE.

2.17 Por ejemplo, si se consideran todas las escalerillas de pasajeros del aeropuerto, con motores diésel de 95 kW, un EI de 6,0 g NO<sub>x</sub>/kWh y un factor de carga de 25%, para un total de 3 500 horas de funcionamiento, y se supone un factor de deterioro del 3%, la cantidad total de emisiones de NO<sub>x</sub> es:

$$95 \text{ kW} \times 0,25 \text{ factor de carga} \times 6,00 \text{ g/kW-h} \times 3 \text{ 500 horas} \times 1,03 \text{ factor de deterioro} \\ = 513 \text{ 712.5 g (514 kg NO}_x\text{)}.$$

### Enfoque sofisticado

2.18 En este enfoque, se calculan todas las emisiones de GSE para cada operación de aeronave individual (por ejemplo, llegada, salida y mantenimiento). Esta distinción operacional corresponde cuando se relacionan las actividades de servicio de escala a la aeronave con las tablas de vuelo donde un vuelo de llegada y salida no tiene el mismo número de vuelo o la llegada y la salida no están en una secuencia temporal (por ejemplo, para escalas nocturnas).

$$\text{Emisión}_{\text{Contaminante}} [\text{g}] = \text{potencia} [\text{kW}] \times \text{factor de carga} [\%] \times \text{factor de emisión}_{\text{Contaminante}} \\ [\text{g/kWh}] \times \text{tiempo}_{\text{OA/C-Ops}} [\text{h}] \times \text{DF} \quad \text{Ec. 3-A2-5}$$

donde:

$\text{hora}_{\text{OA/C-Ops}} [\text{h}]$  = tiempo medio de funcionamiento de la unidad GSE, dependiendo del tipo de operación (llegada, salida o mantenimiento), propiedades del puesto de estacionamiento y tamaño de la aeronave; y

DF = factor de deterioro (refleja la edad y el mantenimiento del GSE).

2.19 Nuevamente, las emisiones de GSE se contabilizan para todas las partes individuales de un tipo de equipo específico y para todas las operaciones individuales de servicio de escala a la aeronave (incluyendo el mantenimiento).

2.20 Por ejemplo, una escalerilla para pasajeros funciona durante 10 minutos para una aeronave de tamaño B-737 en un puesto de estacionamiento abierto (por ejemplo, distante) a la llegada. La escalerilla tiene un motor de 45-kW, que funciona al 25% de la carga, con un EI de NO<sub>x</sub> de 6,0 g/kW-h y un factor de deterioro del 3%. El NO<sub>x</sub> total para esta operación de GSE es:

$$45 \text{ kW} \times 0,25 \text{ factor de carga} \times 6,0 \text{ g/kW-h} \times 1,03 \text{ factor de deterioro} \times 10 \text{ minutos} \\ \times 1\text{-hora}/60 \text{ minutos} = 11,61 \text{ g NO}_x.$$

## 3. TRÁNSITO DE VEHÍCULOS EN LA PARTE AERONÁUTICA

3.1 El tránsito de vehículos en la parte aeronáutica abarca toda la maquinaria y los vehículos que funcionan en las vías de servicio de la parte aeronáutica dentro del perímetro del aeropuerto a diferencia de los puestos de estacionamiento de aeronave solamente. En este contexto, se considera que las emisiones se generan mientras se recorren distancias más que durante períodos de tiempo. Los vehículos de la parte aeronáutica no incluyen el GSE como se definió previamente. Además, el tránsito de pasajeros y empleados por la parte pública se describe por separado en el Apéndice 4 de este capítulo.

3.2 La mayoría de los vehículos de la parte aeronáutica son “vehículos de uso equivalente al carretero” y el cálculo de sus emisiones puede efectuarse en la misma forma que para los vehículos carreteros de la parte pública. En el Apéndice 4 también se proporciona orientación para este cálculo.



#### 4. REABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE A LAS AERONAVES

4.1 En la mayoría de los aeropuertos, las aeronaves son reabastecidas de combustible mediante un sistema de cañerías subterráneas con camiones con hidrantes de combustible o a partir de camiones cisterna individuales. En ambos casos, los tanques de combustible de la aeronave emiten vapores de combustible (remanente de la mezcla de combustible con aire durante el vuelo) durante el proceso de reabastecimiento. También se emiten vapores cuando el camión cisterna se llena con combustible en el depósito o instalación de almacenamiento equivalente. No se considera que las emisiones debidas a la manipulación de combustible durante el traslado al depósito o instalación de almacenamiento sea parte de este procedimiento, pero las mismas se describieron por separado en el Apéndice 3 de este capítulo.

4.2 Los datos operacionales necesarios para calcular las emisiones de reabastecimiento de combustible son:

- a) volumen de combustible, por tipo de combustible (por ejemplo, keroseno o gasolina de aviación), suministrado a la aeronave por un camión con hidrante de combustible (kg); o
- b) cantidad de combustible suministrada a la aeronave por un camión cisterna (kg).

4.3 Los factores de emisión promedio (también denominados índices de emisión (EI) necesarios son:

- a) emisiones en g VOC/kg de combustible para reabastecimiento con keroseno; y
- b) emisiones en g VOC/kg de combustible para reabastecimiento con gasolina de aviación.

4.4 En la Tabla 3-A2-6 se proporcionan los factores de emisión típicos para Zurich (Suiza). El análisis debería realizarse utilizando valores de factor de emisión apropiados para el Estado o aeropuerto que se está evaluando.<sup>3</sup>

**Tabla 3-A2-6. Factores de emisión típicos para Zurich (Suiza)**

Reabastecimiento de combustible de aeronaves*	Unidad	Valor
Reabastecimiento con keroseno	g VOC/kg de combustible	0,01
Reabastecimiento con gasolina de aviación	g VOC/kg de combustible	1,27

\* KIGA (Oficina Cantonal de Comercio e Industria) Zurich (Suiza), 1994 (pueden usarse otros valores si se consideran más apropiados).

4.5 De esta información, el cálculo de las emisiones se realiza aplicando la siguiente ecuación general:

$$\text{Emisiones [g VOC]} = \sum_{\text{tipo de combustible}} ((\text{combustible}_{\text{por hidrante}} [\text{kg}] + 2 \times \text{combustible}_{\text{por cisterna}} [\text{kg}]) \times \text{factor de emisión [g/kg]e}) \quad \text{Ec. 3-A2-6}$$

3. Por ejemplo, de la guía de inventarios de emisiones de contaminantes del aire de EMEP/EEA, *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013*, 1.B.2.a.v.

4.6 Por ejemplo, si se entregan por camión un total de 1 500 000 kg de Jet A-1 (EI de 0,01 g VOC/kg), el 85% de los cuales mediante un sistema de hidrante y 500 kg de avgas (EI de 1,27 g VOC/kg), la cantidad total del abastecimiento de combustible de la aeronave es:

$$(1\ 500\ 000\ \text{kg Jet A-1} \times 0,85 \times 0,01\ \text{g VOC/kg Jet A-1}) + (1\ 500\ 000\ \text{kg Jet A-1} \times 0,15 \times 2\ \text{conexiones} \times 0,01\ \text{g VOC/kg Jet A-1}) + (500\ \text{kg avgas} \times 2\ \text{conexiones} \times 1,27\ \text{g VOC/kg avgas}) = 18\ 520\ \text{kg VOC.}$$

## 5. DESHIELO DE LAS AERONAVES

5.1 Las operaciones de deshielo de aeronaves y de instalaciones de aeródromo puede ser una fuente de VOC y otros compuestos. La aplicación mecánica de agentes de deshielo y antihielo, compuestos de glicol de propileno y glicol de etileno y agua, a las aeronaves presenta algunas pérdidas a la atmósfera debido a la evaporación y a la sobreaspersión. No obstante, debido a las crecientes preocupaciones sobre los efectos de los productos químicos de deshielo sobre la calidad del agua, ahora se aplican comúnmente procedimientos de conservación y recuperación que también reducen los posibles impactos sobre la calidad del aire.

5.2 Las emisiones de VOC de las actividades de deshielo y antihielo<sup>4</sup> se basan generalmente en la cantidad de fluido de hielo utilizado, el porcentaje del agente químico de deshielo (es decir glicol de etileno) en la mezcla y un factor de emisión. En la Tabla 3-A2-7 se presenta una fuente de datos de emisiones de VOC para actividades de deshielo/antihielo de aeronaves y para pistas, calles de rodaje, etc., en Estados Unidos. El análisis debería realizarse utilizando valores de factores de emisión apropiados para el Estado o aeropuerto que se está evaluando.

**Tabla 3-A2-7. Fuente de los Estados Unidos de datos de emisiones — actividades de deshielo/antihielo**

Sustancia	Fuente
Glicol de propileno/glicol de etileno	<i>Aviation Emissions and Air Quality Handbook</i> , 2014 de la FAA

5.3 Para fines de demostración, se proporciona la siguiente fórmula para calcular las emisiones de VOC de las actividades de deshielo y antihielo:

$$E_{\text{VOC}} = DF \times DS \times W_{\text{DS}} \times EF \tag{Ec. 3-A2-7}$$

donde:

- $E_{\text{VOC}}$  = emisiones de VOC (por ejemplo, kilogramos);
- $DF$  = cantidad de fluido de deshielo (por ejemplo, litros);
- $DS$  = cantidad de sustancia de deshielo en el fluido de deshielo (porcentaje);
- $W_{\text{DS}}$  = peso de la sustancia de deshielo (por ejemplo, kilogramos/litro); y
- $EF$  = factor de emisión (por ejemplo, kilogramos/kilogramos de sustancias de deshielo).

4. En los aeropuertos, hay dos tipos de actividades de deshielo independientes: deshielo de aeronaves, como parte de las actividades del servicio de escala a una aeronave, y deshielo de superficies como parte del mantenimiento del aeropuerto (independientemente del volumen del tránsito o tamaño de las aeronaves).

5.4 Aplicando esta fórmula, se proporciona el siguiente ejemplo para las operaciones de deshielo en un aeropuerto. Se supone que el aeropuerto utiliza 5 kilolitros de una mezcla de deshielo para el deshielo de aeronaves y el 65% de la mezcla es glicol de etileno. El peso (o densidad) del glicol de etileno es aproximadamente 2 kilogramos/kilolitro y el factor de emisión es 0,11 kilogramos de VOC por kilogramo de glicol de etileno utilizado. Por lo tanto, el volumen de emisiones de VOC producido sería:

$$\begin{aligned} & 5 \text{ kilolitros} \times 0,65 \times 2 \text{ kilogramos/kilolitros} \times 0,11 \text{ kilogramos VOC/kilogramo de agente de deshielo} \\ & = 0,65 \text{ kilogramos de VOC.} \end{aligned}$$

5.5 Futuros niveles de emisión pueden basarse en un aumento proyectado de las operaciones de aeronave o sobre el área total de pistas, calles de rodaje y calzadas, si corresponde.

-----

## Apéndice 3 del Capítulo 3

# FUENTES DE EMISIONES RELACIONADAS CON INFRAESTRUCTURA Y ESTACIONARIAS

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Los aeropuertos se consideran normalmente como un conjunto de fuentes de emisiones “móviles” (es decir aeronaves, GSE y vehículos motorizados). No obstante, la mayoría de los aeropuertos también comprenden fuentes de emisiones “estacionarias” (calderas, generadores de emergencia, incineradores, etc.) como parte de su infraestructura e instalaciones de apoyo. En contraste con las fuentes móviles, las fuentes estacionarias son “inmóviles” y permanecen “fijas” o “estáticas”, descargando las emisiones mediante una variedad de sistemas como conductos de humo, chimeneas, tubos de escape o respiraderos.

1.2 Otras fuentes de emisiones al aire relacionadas con infraestructura aeroportuaria se clasifican como fuentes de “área”. Estas fuentes descargan emisiones directamente a la atmósfera y pueden ser móviles o estacionarias. Normalmente, las fuentes de área en los aeropuertos comprenden instalaciones de almacenamiento/traslado de combustible, instalaciones de instrucción de bomberos, operaciones de deshielo y actividades de construcción. También categorizadas como fuentes de emisión “fuera de ruta” o “no carreteras”, las actividades de construcción comprenden una amplia gama de camiones, removedores de tierra, excavadoras, pavimentadoras y otro equipo pesado. Las actividades de construcción que entrañan el almacenamiento y transporte de materias primas, la eliminación de desechos de construcción y la producción de asfalto u hormigón también se consideran fuentes de área.

1.3 En este apéndice se proporciona orientación sobre la preparación de estimaciones de emisiones de fuentes estacionarias y de área en los aeropuertos y para contaminantes de CO, THC, NMHC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub>.

1.4 Existe una amplia gama de base de datos de factores de emisión que pueden utilizarse para calcular los tipos y cantidades de descargas de emisiones de las fuentes estacionarias en los aeropuertos. No obstante, las dos citadas más comúnmente en Europa y Norteamérica son las producidas por la EPA de los Estados Unidos y la Agencia Europea de Medio Ambiente:

- a) Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos, Oficina de planificación y normas sobre calidad del aire, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources (AP-42)*, quinta edición, 1995 (con suplementos hasta 2009); y
- b) *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook* (2013 o versiones posteriores): <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>.

1.5 No obstante, los enfoques metodológicos establecidos en los documentos citados son muy similares a los aplicados en otros países y regiones y no corresponde al alcance de este manual de orientación indicar todas las fuentes de información nacionales. En este apéndice, se presentan varios ejemplos utilizando datos de la EPA de los Estados Unidos pero los autores podían haber elegido otros. El uso de los factores de emisión más apropiados corresponde a la responsabilidad de los funcionarios aeroportuarios encargados de elaborar inventarios de emisiones.

## 2. PLANTAS ELECTRÓGENAS Y DE CALEFACCIÓN, CALDERAS Y GENERADORES

2.1 Las emisiones de las plantas electrógenas o de calefacción (es decir calderas y calefactores) y generadores de emergencia corresponden en gran medida a los escapes del consumo de combustibles basados en hidrocarburos. Estas emisiones comprenden CO, NO<sub>x</sub>, HC, SO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub>. Varios combustibles se utilizan en las plantas de generación de electricidad/calefacción, incluyendo carbón, fuelóleo, gasóleo (diésel), gasolina, gas natural así como gas de petróleo líquido (LPG) cada uno de ellos con sus propias características de emisión.

2.2 Para las fuentes estacionarias existentes que cuentan con permisos de funcionamiento, los tipos y cantidades de emisiones de contaminantes del aire pueden obtenerse normalmente de los ficheros de la agencia normativa apropiada o del propio permiso de funcionamiento. En ausencia de dicho permiso o información de apoyo, las emisiones se basan normalmente en el período de tiempo (horas de potencia) del uso real o estimado del equipo (es decir regímenes de actividad), el tipo de combustible y cualquier tecnología aplicable de control o reducción de emisiones. Para calderas o calefactores de espacio nuevos o ampliados, los futuros regímenes de actividad pueden basarse en el aumento del área terminal del aeropuerto en los casos en que sea suficiente contar con estimaciones aproximadas para el análisis.

2.3 En la Tabla 3-A3-1, se presentan fuentes de datos sobre emisiones disponibles comúnmente utilizadas para calderas o calefactores de espacio (por tipo de combustible y contaminantes), y en la Tabla 3-A3-2 se proporcionan datos sobre emisiones para generadores de emergencia.

**Tabla 3-A3-1. Fuentes de datos sobre emisiones — calderas/calefactores de espacio**

Combustible	Fuente
Carbón, incluyendo: antracita, bituminoso, bituminoso/subbituminoso y subbituminoso	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 1 <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupos 1.A.1 and 1.A.4
Fueloil	EPA, AP 42, Quinta Edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Ch. 1 <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupos 1.A.1 and 1.A.4
LPG	EPA, AP 42, Quinta Edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 1 <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupos 1.A.1 and 1.A.4
Natural gas	EPA, AP 42, Quinta Edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 1 <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupos 1.A.1 and 1.A.4
LPG	EPA, AP 42, Quinta Edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 1 <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupos 1.A.1 y 1.A.4

**Tabla 3-A3-2. Fuentes de datos sobre emisiones — generadores de emergencia**

Combustible	Metodología	Fuente
Gasóleo (combustible diésel)	USAF (petróleo destilado)	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 3
Gasolina	USAF	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 3
Keroseno/nafta (combustible de reactores)	USAF	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 3
LPG (propano o butano)	USAF	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 3
Gas natural	USAF	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 3
Residual/petróleo crudo	USAF	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 3
Combustibles varios	EEA	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 3

2.4 Para demostración, las estimaciones de las emisiones procedentes de plantas electrógenas o de calefacción, calderas y generadores se calculan aplicando la siguiente ecuación general:

$$E = A \times EF \times (1-ER/100) \quad \text{Ec. 3-A3-1}$$

donde:

E = emisiones (por ejemplo, kilogramos/día);

A = régimen de actividad (por ejemplo, potencia-hora o litros/día);

EF = factor de emisión (por ejemplo, kilogramos/litro específico al tipo de combustible y contaminante); y

ER = eficiencia de la reducción de emisiones del equipo de control (%).

2.5 En los casos en que el contenido de azufre en el combustible es importante, puede ser más apropiado utilizar una fórmula alternativa. Aplicando esta fórmula, se proporciona el siguiente ejemplo para un generador de emergencia de aeropuerto. Se supone que el aeropuerto tiene un generador de emergencia con motor diésel de 335 caballos de potencia con una eficiencia de reducción de emisiones del 75%. Si el factor de emisión para NO<sub>x</sub> es 14,0 gramos/hora de potencia y el aeropuerto opera el generador 1 000 horas por año, las emisiones totales de NO<sub>x</sub> serían:

$$\begin{aligned} &1\ 000 \text{ horas} \times 14,0 \text{ gramos/potencia-hora} \times 335 \text{ caballos} \times (1-75/100) \\ &= 1\ 172\ 500 \text{ gramos de NO}_x. \end{aligned}$$

### 3. INCINERADORES

3.1 Cuando están emplazados en los aeropuertos, los incineradores se utilizan normalmente para destruir o esterilizar desperdicios y otros productos de desechos reglamentados producidos y transportados en aeronaves internacionales. El aeropuerto también puede contar con instalaciones para preparación de alimentos que utilizan los incineradores para eliminar desechos sólidos (es decir papel, madera, plástico y otro tipo de basura).

3.2 Los incineradores de desechos combustibles presentan una amplia gama de tipos y configuraciones de hornos (en línea, retortas, etc.), incluyen cámaras de combustión únicas o múltiples y normalmente se alimentan con gas natural, petróleo o LPG. Se utilizan equipos y tecnologías de control tanto en el proceso de quemado como en la chimenea para contribuir a la reducción del exceso de emisiones.

3.3 Para los incineradores existentes que cuentan con permisos de funcionamiento, pueden obtenerse estimaciones de las emisiones de contaminantes del aire a partir de los ficheros apropiados del órgano de reglamentación o del propio permiso de funcionamiento. En ausencia de dicho permiso, las estimaciones de emisiones se basan a menudo en el tipo de combustible, el contenido y cantidad de basura incinerada y los factores de emisión apropiados para el combustible, la basura y el diseño de la cámara de combustión. Para instalaciones nuevas y ampliadas, las cantidades previstas de desechos incinerados pueden basarse en el aumento proyectado en los vuelos internacionales o en el aumento de los proveedores de servicio de alimentación, si corresponde.

3.4 En la Tabla 3-A3-3 se proporcionan las fuentes de uso más común de datos sobre regímenes de emisión para los incineradores de desechos combustibles.

**Tabla 3-A3-3. Fuentes de datos de regímenes de emisión — incineradores de desechos combustibles**

<i>Número de cámaras</i>	<i>Fuente</i>
Una y varias	EPA, AP-42, Quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol.1, Capítulo 2  <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupo 5

3.5 Para demostración, las estimaciones de las emisiones de un incinerador de desechos combustibles se calculan aplicando la ecuación general siguiente:

$$E = A \times EF \times (1-ER/100) \quad \text{Ec. 3-A3-2}$$

donde:

E = emisiones (por ejemplo, kilogramos/año, gramos/día);

A = cantidad de basura incinerada (por ejemplo, toneladas métricas o kilogramos/día);

EF = factor de emisión (por ejemplo, kilogramos o gramos/tonelada métrica); y

ER = eficiencia de reducción de las emisiones del equipo de control (%).

3.6 Aplicando esta fórmula, se proporciona el siguiente ejemplo para un incinerador. Se supone que el aeropuerto tiene un incinerador de cámara única con una eficiencia de reducción de emisiones del 80%. Si el factor de emisión para CO es 1,0 kilogramos/toneladas métricas de desechos y que el aeropuerto incinera 2 500 toneladas métricas de desecho, las emisiones del CO totales serían:

1,0 kilogramos  $\times$  2 500 toneladas métricas  $\times$  (1-80/100) = 500 kilogramos de CO (es decir 0,5 toneladas métricas).

#### 4. INSTALACIONES DE MANTENIMIENTO DE AERONAVES Y AEROPUERTO

4.1 En la mayoría de los grandes aeropuertos, las instalaciones de mantenimiento de aeronaves son operadas normalmente por las líneas aéreas comerciales u otros proveedores de servicios y realizan inspecciones y reparaciones programadas del fuselaje, motores y otros aparatos de la aeronave. También pueden realizarse varias operaciones de tratamiento, revestimiento y pintura de superficie. En aeropuertos más pequeños estos servicios de mantenimiento se ofrecen normalmente por explotadores con base fija privados (FBO).

4.2 Con frecuencia, los aeropuertos contienen también varias instalaciones de apoyo para el personal de construcción y de mantenimiento del aeródromo, suministros y actividades. Las acciones y operaciones que generan emisiones relacionadas con otro tipo de instalaciones comprenden la pintura de edificios, trazados de líneas en pistas/calles de rodaje/plataformas, reparación de asfalto y hormigón y limpieza. Debido a que estas actividades involucran a menudo revestimientos líquidos, solventes basados en petróleo y otras sustancias que se evaporan, los contaminantes de interés principal son los VOC.

4.3 En la mayoría de los casos, las emisiones de estas fuentes resultan normalmente de la evaporación o la sobrepulverización de los materiales empleados. Sólo en algunos casos se considera que las cantidades de emisiones son importantes.

4.4 Pueden utilizarse hojas de datos de seguridad del material (MSDS) para la mayoría de productos y sustancias a efectos de obtener el contenido volátil del VOC [normalmente expresado en libras (o gramos) de VOC por galón (o litro) de la sustancia empleada]. Otras fuentes de datos de regímenes de emisión para revestimiento de superficie y otros solventes se proporcionan en la Tabla 3-A3-4.

**Tabla 3-A3-4. Fuentes de datos de regímenes de emisión — instalaciones de mantenimiento de aeronaves y aeroportuarias**

Actividad	Sustancia	Fuente
Revestimiento de superficie	Pintura (con solventes y al agua), esmalte, lacas, aprestos, barnices, diluyentes y adhesivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>FAA Aviation Emissions and Air Quality Handbook</i>, 2014</li> <li>• <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupo 2.D</li> </ul>
Desgrasadores solventes	Acetona, alcohol (etilo y metilo), tetracloruro de carbono, cloroformo, éter, alcohol isopropílico, cloruro de metileno, percloro etileno, solvente stoddard, 1,1,1-tricloroetano, tricloro etileno y trementina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>FAA Aviation Emissions and Air Quality Handbook</i>, 2014</li> <li>• Occupational Safety and Health Administration (OSHA) <a href="https://www.osha.gov/">https://www.osha.gov/</a></li> <li>• <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupo 2.D</li> </ul>

4.5 Para fines de demostración, las estimaciones de emisiones de VOC procedentes de revestimientos de superficies pueden obtenerse aplicando la siguiente ecuación general que considera la cantidad de sustancias de revestimiento utilizadas, el contenido en VOC de la sustancia y, si corresponde, un factor de eficiencia de reducción de emisiones para el proceso de aplicación:



$$E_{\text{VOC}} = Q \times \text{VOCC} \times \text{ER}$$

Ec. 3-A3-3

donde:

$E_{\text{VOC}}$  = emisiones de VOC (por ejemplo, kilogramos);

$Q$  = cantidad de sustancia de revestimiento (por ejemplo, litros);

$\text{VOCC}$  = contenido en VOC de la sustancia de revestimiento (por ejemplo, gramos/litro); y

$\text{ER}$  = eficiencia de la reducción de emisiones del tipo de control (%).

4.6 Aplicando esta fórmula, se proporciona el ejemplo siguiente para el uso de un solvente de limpieza de metales. Si una instalación de mantenimiento de aeronaves emplea 2 500 litros de pintura de apresto en una cabina de aspersión que tiene una eficiencia de reducción de emisiones de 65% y el contenido en VOC de la pintura de apresto de 3,2 kilogramos por litro, la cantidad de VOC emitida sería:

$$2\,500 \text{ litros} \times 3,2 \text{ kilogramos/litro} \times (1-65/100) = 2\,800 \text{ kilogramos de VOC (2,8 toneladas métricas).}$$

4.7 Otro ejemplo sería la evaporación de un solvente directamente a la atmósfera. En este caso, se supone que no se elimina todo el solvente. Por consiguiente, según lo muestra la siguiente ecuación, la diferencia entre la cantidad de solvente utilizado y la cantidad de solvente eliminado se multiplica por la densidad de la sustancia para obtener la cantidad emitida a la atmósfera:

$$E_{\text{VOC}} = (Q_C - Q_D) \times D$$

Ec. 3-A3-4

donde:

$E_{\text{VOC}}$  = emisiones de VOC;

$Q_C$  = cantidad de solvente consumido (por ejemplo, litros);

$Q_D$  = cantidad de solvente eliminado como desecho líquido (por ejemplo, litros); y

$D$  = densidad del solvente (por ejemplo, kilogramos/litro).

4.8 Aplicando esta fórmula, se proporciona el siguiente ejemplo para un generador de emergencia de aeropuerto. Se supone que una instalación de mantenimiento de aeropuerto emplea 950 litros de trementina, elimina 750 litros como desecho líquido y que la densidad de la trementina es 0,87 kilogramos por litro. La cantidad de VOC sería:

$$950 \text{ litros consumidos} - 750 \text{ litros eliminados} = 200 \text{ litros}$$

$$200 \text{ litros} \times 0,87 \text{ kilogramos/litro} = 174 \text{ kilogramos de VOC (es decir 0,174 toneladas métricas).}$$

## 5. DEPÓSITOS DE COMBUSTIBLE, SISTEMAS DE HIDRANTE Y ESTACIONES DE REABASTECIMIENTO DE VEHÍCULOS

5.1 Las instalaciones aeroportuarias de almacenamiento y traslado de combustible pueden contener varios combustibles siendo los tipos predominantes el combustible de reactores (Jet-A, keroseno de reactores, JP-4), gasolina de aviación (avgas) y combustibles para vehículos motorizados (gasolina y diésel). Estas instalaciones y operaciones de traslado son posibles fuentes de hidrocarburos que se evaporan (por ejemplo, VOC).

5.2 Los tanques de almacenamiento de combustibles pueden emitir VOC tanto de actividades “en reposo” (es decir almacenamiento) como “en trabajo” (es decir retiro o relleno). Entre las importantes variables con consecuencias en las cantidades de emisiones liberadas están la presión de vapor del combustible, los volúmenes de almacenamiento y caudal, los tipos de tanques (sobre la superficie, techo flotante, etc.) y las condiciones climáticas (es decir temperatura y humedad). Lo importante es que las presiones de vapor del combustible de reactores y diésel son tan bajas que la mayoría de los órganos ambientales no exigen controles de estas emisiones.

5.3 Una fuente comúnmente utilizada para datos de regímenes de emisión de los tanques de almacenamiento de combustible figura en la Tabla 3-A3-5.

**Tabla 3-A3-5. Fuentes de datos de regímenes de emisión — tanques de almacenamiento de combustible**

Tipo de tanque	Combustible	Fuente
Horizontal, vertical techo fijo, techo flotante interno, techo flotante externo, techo flotante externo en cúpula	Nafta para reactores (JP-4), kerosene para reactores, gasolina, fueloil destilado núm. 2, fueloil residual núm. 6	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 7: Tanques de almacenamiento de combustible; <i>EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook</i> (2013 o versiones más recientes), grupo 1.B.2

5.4 Para fines de demostración, las estimaciones de las emisiones de VOC de los tanques de almacenamiento de combustible pueden obtenerse aplicando la siguiente ecuación general, que considera tanto las pérdidas en reposo como en trabajo.

$$E_{VOC} = SL + WL = (QS \times EF) + (QT \times EF) \quad \text{Ec. 3-A3-5}$$

donde:

- $E_{VOC}$  = emisiones de VOC (por ejemplo, kilogramos);
- SL = pérdidas en reposo;
- WL = pérdidas en trabajo;
- QS = cantidad de combustible almacenado (por ejemplo, kilolitros);
- QT = cantidad de caudal de combustible (por ejemplo, kilolitros); y
- EF = factor de emisión para el tipo de combustible (por ejemplo, kilogramos/kilolitro).

5.5 Aplicando esta fórmula, se proporciona el ejemplo siguiente para el almacenamiento y traslado de combustible de reactores en un tanque sobre la superficie. Si una instalación de combustible almacena 1 500 kilolitros de combustible de reactores (con una pérdida en reposo de 200 gramos de VOC/kilolitro por día) y entrega 90 kilolitros de combustible por día (con una pérdida en trabajo de 100 gramos de VOC/kilolitro por día), la cantidad estimada de VOC emitida sería:

$$(1\ 500 \text{ kilolitros} \times 200 \text{ gramos/kilolitro}) + (90 \text{ kilolitros} \times 100 \text{ gramos/kilolitro}) = 309 \text{ kilogramos de VOC (es decir 0,31 toneladas métricas).}$$

## 6. INSTRUCCIÓN PARA LUCHA CONTRA INCENDIOS

6.1 En algunos aeropuertos, el personal de salvamento y extinción de incendios en el aeropuerto (ARFF) realiza ejercicios de respuesta de emergencia empleando simuladores con fuego real. Alimentadas con combustibles de reactores o diésel, estas instalaciones pueden ser fuente de denso humo negro, PM y VOC cuando se las utiliza. También se dispone de nuevos combustibles de “humo reducido” que se consideran más aceptables para el medio ambiente al igual que las instalaciones alimentadas con propano.

6.2 La cantidad de combustible utilizada para las actividades de instrucción ARFF con “fuego real” varía según la frecuencia de uso, los tipos de incendio creados y el tipo de combustible.

6.3 El *Aviation Emissions and Air Quality Handbook* de la FAA es la fuente de información más fiable para las actividades de instrucción de lucha contra incendios y no figura dentro de las publicaciones de EMEP/EEA. En la Tabla 3-A3-6 se proporcionan fuentes disponibles de datos de regímenes de emisión para los combustibles más comunes utilizados en las actividades de instrucción de lucha contra incendio.

**Tabla 3-A3-6. Fuentes de datos de regímenes de emisión — instrucción de lucha contra incendios**

Tipo de combustible	Fuente
JP-4, JP-8, propano	FAA <i>Aviation Emissions and Air Quality Handbook</i> , 2014
JP-5, tekflame	FAA <i>Aviation Emissions and Air Quality Handbook</i> , 2014

6.4 Las estimaciones de las emisiones de contaminantes procedentes de los ejercicios de instrucción con fuego real se basan en el tipo de combustible, cantidad de combustible quemado y regímenes de emisión por contaminante. Estas emisiones pueden calcularse aplicando la siguiente ecuación:

$$E_{\text{VOC}} = \text{QF} \times \text{EF} \quad \text{Ec. 3-A3-6}$$

donde:

$E_{\text{VOC}}$  = emisiones de VOC;

QF = cantidad de combustible (por ejemplo, en kilolitros); y

EF = factor de emisión (por ejemplo, gramos/kilolitro de combustible).

6.5 Aplicando esta fórmula, se proporciona el siguiente ejemplo de una instalación de instrucción ARFF con fuego real. Se supone que el aeropuerto realiza instrucción con fuego real una vez por mes y que cada vez se utilizan 3 kilolitros de propano (es decir 36 kilolitros por año). Suponiendo un factor de emisión de PM para el propano de 18 kilogramos/kilolitro de combustible, la cantidad de PM emitida sería:

$$36 \text{ kilolitros} \times 18 \text{ kilogramos/kilolitro} = 648 \text{ kilogramos de PM (es decir 0,65 toneladas métricas).}$$

## 7. ACTIVIDADES DE DESHIELO Y ANTIHIELO

7.1 Las operaciones de deshielo para la superficie de aeródromo pueden ser una fuente de VOC y otros compuestos. Los agentes de deshielo y antihielo están compuestos de glicol de propileno o glicol de etileno y agua y su aplicación mecánica resulta en algunas pérdidas a la atmósfera debidas a la evaporación y sobre pulverización. En pistas, calles de rodaje y plataformas, se utilizan urea, acetato de potasio o soluciones de glicol de etileno, urea y agua. No obstante, debido a las crecientes preocupaciones sobre las consecuencias de las sustancias químicas de deshielo para la calidad del agua, actualmente se usan procesos de conservación y recuperación, que contribuyen a reducir el potencial efecto nocivo en la calidad del aire.

7.2 Las emisiones de VOC procedentes de actividades de deshielo y antihielo se basan en general en la calidad de fluidos de deshielo aplicado, el porcentaje de la sustancia química de deshielo (es decir glicol de etileno) en la mezcla y un factor de emisión. Las fuentes de datos de regímenes de emisión de VOC para las actividades de deshielo y antihielo en aeronaves y para pistas, calles de rodaje, etc., se proporcionan en la Tabla 3-A3-7. Un ejemplo de cálculo para el deshielo de aeronaves figura en el Apéndice 2, sección 5, y el cálculo para las superficies de aeródromo se realiza en la misma forma.

**Tabla 3-A3-7. Fuentes de datos de regímenes de emisión — actividades de deshielo y antihielo**

Sustancia	Fuente
Glicol de propileno/glicol de etileno	FAA <i>Aviation Emissions and Air Quality Handbook</i> , 2014

## 8. ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN

8.1 Las actividades de construcción que generan emisiones de contaminantes del aire comprenden la limpieza de terrenos y demolición de construcciones (emisiones de polvo), el uso de equipo y vehículos de construcción (emisiones de escape), almacenamiento de materias primas (emisiones por erosión eólica), y pavimentación (emisiones por evaporación). Los vehículos relacionados con actividades de construcción abarcan aquellos que permanecen en el lugar de construcción (por ejemplo, vehículos fuera de carretera o no carreteros) y vehículos que viajan al exterior del sitio (por ejemplo, camiones de transporte y vertedores). Las emisiones de contaminantes también pueden deberse a los viajes que los empleados de la construcción realizan hacia y desde el emplazamiento de la obra.

8.2 En la Tabla 3-A3-8 se proporcionan fuentes comunes en Estados Unidos sobre datos de regímenes de emisión para actividades de construcción.

**Tabla 3-A3-8. Fuentes de datos de regímenes de emisión — actividades de construcción**

Actividad/tipo de vehículo	Fuente
Limpieza de terrenos/demolición	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 13: <i>Miscellaneous Sources</i> s)
Equipo de construcción/vehículos (fuera de ruta)	EPA modelo NONROAD
Vehículos de construcción (carretero)	EPA modelo MOBILE
Pilas de almacenamiento de material (en reposo y en trabajo)	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 13: <i>Miscellaneous Sources</i>
Pavimentación con asfalto	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 4: <i>Evaporation Loss Sources</i>
Plantas de mezclado por lotes	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 11: <i>Mineral Products Industry</i>
Producción de hormigón por lotes	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 11: <i>Mineral Products Industry</i>
Quemado al aire libre	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 2: <i>Solid Waste Disposal</i>
Viajes de vehículos sobre caminos no pavimentados	EPA, AP-42, quinta edición, <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> , Vol. 1, Capítulo 13: <i>Miscellaneous Sources</i>

8.3 Para Europa, los factores de emisión correspondientes a estas actividades figuran en el *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook* (2013 o versiones más recientes), grupos 1.A.3, 1.A.4, 2.D, 5.A, 5.C.

8.4 Para fines de demostración, las estimaciones de las emisiones de PM emitidas por las pilas en trabajo y en reposo pueden obtenerse utilizando la siguiente ecuación general, que considera el rendimiento de la operación [es decir, la cantidad de material utilizado en un tiempo determinado y el número de caídas que sufre el material (una vez durante la carga y una vez durante la descarga)]. Es evidente que los factores de emisión para diversos materiales varían según el tipo, el tamaño de partículas, el contenido de limo y el contenido de humedad del material.

$$E_{PM} = 2 \times TH \times EF$$

Ec. 3-A3-7

donde:

$E_{PM}$  = emisiones de PM (por ejemplo, kilogramos);

2 = número de caídas del material;

TH = rendimiento total; y

EF = factor de emisión (por ejemplo, gramos).

8.5 Aplicando esta fórmula, se proporciona el ejemplo siguiente para operaciones de construcción en un aeropuerto. Se supone que una operación de construcción involucre el movimiento de 100 toneladas métricas de piedra caliza. Dado un contenido de humedad de aproximadamente el 0,2%, un tamaño de partícula aerodinámica de 0,45 micrómetros y una velocidad media del viento de 20 kilómetros por hora, la cantidad de PM generada sería la siguiente, basándose en un factor de emisión de 54 gramos/tonelada métrica:

2 x 100 toneladas métricas x 54 gramos/tonelada métrica = 10 800 gramos (es decir, 0,01 toneladas métricas).

8.6 Otro ejemplo común de emisiones originadas por actividades de construcción entraña el uso de vehículos fuera de la ruta. La ecuación empleada para obtener las estimaciones de contaminantes de este tipo de actividad de construcción considera el tipo de equipo (por ejemplo, topadora, camión articulado), el tamaño del equipo (es decir, potencia), el factor de carga colocado en el equipo (es decir, la relación de la carga en un determinado período de tiempo y la carga máxima) y el período (es decir, horas) de operación.

8.7 Para fines de demostración, las estimaciones de las emisiones de escapes de los vehículos y equipo de construcción pueden obtenerse de la siguiente fórmula.

$$E = H \times EF \times LF \times T$$

Ec. 3-A3-8

donde:

E = emisiones (por ejemplo, gramos/día);

H = potencia del equipo;

EF = factor de emisión (por ejemplo, gramos/caballos de potencia-hora);

LF = factor de carga (porcentaje); y

T = período de operación total (horas).

8.8 Aplicando esta fórmula, se proporciona el siguiente ejemplo para el uso de una topadora. Se supone que un contratista en el aeropuerto utiliza una topadora de 400 caballos de potencia durante 3 horas cada día, 15 días por mes, durante un año, y que el factor de carga medio para el equipo es de 59%. Si el factor de emisión de la topadora es de 9,6 gramos por caballo de potencia-hora, la cantidad de NO<sub>x</sub> sería:

$$400 \text{ hp} \times 9,6 \text{ gramos/hp-h} \times 0,59 \times 540 \text{ horas} = 1\,223\,424 \text{ gramos (es decir, 1,2 toneladas métricas).}$$

— — — — —



## Apéndice 4 del Capítulo 3

# EMISIONES DEL TRÁNSITO DE VEHÍCULOS

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Las emisiones del transporte de superficie relacionados con el aeropuerto pueden constituir una parte importante del total de emisiones procedentes de las actividades aeroportuarias. La orientación que se proporciona en este apéndice se concentra en enfoques y métodos para preparar un inventario de emisiones para los vehículos motorizados de uso carretero tanto en la parte pública como en la parte aeronáutica. También se analizan los datos y otra información de apoyo necesarios para preparar estas estimaciones. Los aeropuertos pueden tener que incluir en el inventario otros sistemas de transporte de superficie cuyas emisiones puedan atribuirse a operaciones aeroportuarias (por ejemplo, trenes diésel en un enlace ferroviario con el aeropuerto).

1.2 Los vehículos carreteros de la parte pública comprenden taxis, camionetas, autobuses y automóviles particulares; vehículos livianos y pesados, y motocicletas y motonetas que viajan por la red de caminos interna del aeropuerto y dentro de las instalaciones de estacionamiento del mismo. Los vehículos carreteros de la parte aeronáutica son los vehículos que viajan principalmente dentro de un área segura del aeropuerto (es decir, el área en que las aeronaves llegan y salen). Estos vehículos pueden comprender autobuses para tripulantes y pasajeros, vehículos de servicio de aeronaves o aeropuerto y otros vehículos para los cuales se calculan las emisiones de la misma forma que para los vehículos de servicio de la parte pública (es decir, los vehículos se diseñan sobre chasis que se utilizan en caminos públicos y se conducen en la parte aeronáutica en forma similar que en los caminos públicos). En el Apéndice 2 se analizan los enfoques para estimar las emisiones de GSE.

1.3 En las secciones siguientes, se analizan tres enfoques para calcular las emisiones de vehículos motorizados — un enfoque simple, un enfoque avanzado y un enfoque sofisticado — cada uno de los cuales necesita niveles completos crecientes de datos de entrada y complejidad de cálculo.

1.4 Los tres enfoques se basan en el método de “velocidad media del vehículo” aplicado normalmente para los cálculos de emisiones del tránsito carretero para inventarios de escala media (es decir, distrito) y macroescalas (es decir, ciudad o región), a los cuales deben integrarse y compararse las emisiones de los aeropuertos. Se reconoce que los modelos de velocidad promedio pueden tener limitaciones a bajas velocidades de vehículo debido a la variedad de velocidades transitorias. Los resultados de estos modelos también están influidos por la disponibilidad de datos de apoyo de fuentes externas.

### 2. PARÁMETROS

2.1 Dependiendo del enfoque (es decir, simple, avanzado o sofisticado), algunos o la totalidad de los parámetros incluidos en el análisis siguiente están, necesariamente, en diferentes niveles de detalle para la preparación de una estimación de emisiones del tránsito vehicular.

2.2 Aunque la finalidad de esta orientación es preparar un inventario de emisiones, el lector debe observar que, en última instancia, también puede ser necesario un estudio de la calidad del aire aplicando modelos de dispersión. En este contexto, los modelos de calidad del aire incorporan a menudo modelos de tránsito carretero que contienen sólo algunos de los parámetros de entrada necesarios y, por ello, los analistas deben estimar por otros medios los parámetros ausentes.



2.3 Obviamente, ciertos parámetros influirán más que otros sobre los resultados. A estos efectos, puede aplicarse la noción de ordenamiento de parámetros para identificar la importancia relativa de cada uno. El sistema de ordenamiento puede utilizarse para priorizar la recolección de datos de entrada para el inventario.

2.4 El siguiente es un ejemplo del sistema de ordenamiento, basado en experiencias en el Aeropuerto Heathrow de Londres.<sup>1</sup> La lista muestra, por orden de importancia, los parámetros que se estima influyan en los resultados del inventario. El ordenamiento básico se resume en la lista por orden de importancia.

- a) Categoría 1 — extensión de la red caminera;
- b) Categoría 2 — afluencia del tránsito (períodos modelizados — perfiles);
- c) Categoría 3 — flota y composición;
- d) Categoría 4 — velocidades del tránsito carretero;
- e) Categoría 5 — colas de tránsito carretero;
- f) Categoría 6 — fin del viaje; y
- g) Categoría 7 — otros parámetros de tránsito.

En las secciones siguientes también se analizan algunas de las características de cada categoría.

#### **Alcance geográfico — extensión de la red caminera**

2.5 El alcance geográfico define la red caminera y los tipos de camino que corresponden a un inventario de emisiones de tránsito vehicular. El alcance geográfico también se utiliza conjuntamente con el enfoque escogido para identificar el tipo de datos de entrada necesarios para el inventario.

2.6 El alcance geográfico puede limitarse a los caminos y estacionamientos dentro de los límites de la propiedad aeroportuaria (tanto de la parte aeronáutica como de la parte pública) o, en algunos casos, ampliarse para incluir caminos públicos y estacionamientos que “alimentan” al aeropuerto y tienen un considerable volumen de tránsito relacionado con el mismo. La elección del alcance geográfico para un proyecto depende de la finalidad del estudio, del tipo de datos de entrada disponibles y del enfoque escogido, analizado como sigue:

- a) El enfoque simple agrupa todos los caminos para proporcionar un inventario general basado en “distancia total recorrida” [o milla-vehículo recorrida (VMT)] con hipótesis amplias sobre la mezcla de flota de vehículos, edad y velocidad de los mismos. El enfoque simple puede limitarse al perímetro del aeropuerto sin relación con las emisiones regionales de los vehículos.
- b) El enfoque avanzado desglosa los resultados según caminos individuales con arreglo al nivel de detalles de los datos de entrada. Cada segmento de camino requerirá volúmenes de tránsito medio o VMT y velocidades de vehículo típicas.
- c) El enfoque sofisticado capta el mayor detalle posible sobre la red caminera en el estudio, con suficiente detalle para producir un inventario que es altamente sensible a los cambios de infraestructura y utilización. Por ejemplo, la red carretera debería dividirse para obtenerse porciones de gradiente constante a efectos de permitir la compensación de las emisiones cuesta arriba y de las emisiones cuesta abajo.

---

1. Departamento de Transporte (Reino Unido), *Project for the Sustainable Development of Heathrow: Air Quality Technical Report*, 19 de julio de 2006.

2.7 Los enfoques avanzados y sofisticados pueden incluir tránsito fuera del aeropuerto, pero relacionado directamente con actividades aeroportuarias emplazadas en el exterior. Cualquiera sea el enfoque que se aplique, para evitar la doble contabilidad de las emisiones de vehículos, el análisis no debe incluir vehículos en las cercanías del aeropuerto que correspondan a inventarios realizados por otras partes (por ejemplo, vehículos que transiten en caminos cercanos no relacionados con el aeropuerto). Estas emisiones de vehículos que no son aeroportuarios también pueden ser pertinentes para evaluar la calidad del aire en las cercanías del aeropuerto, dependiendo de la finalidad del estudio o de los requisitos normativos de los órganos estatales, regionales o locales.

#### **Alcance temporal — afluencia de tránsito**

2.8 El alcance temporal define el período medio sobre el cual se debe calcular el inventario de emisiones del tránsito de vehículos (por ejemplo, una hora, un día, una temporada, un año). Por convención, se escogen períodos de un año calendario y, entre otras razones, ello simplifica la correspondencia con los datos de EI y las bases de datos nacionales de vehículos.

- a) Para el enfoque simple alcanza con calcular las cantidades anuales totales de las emisiones de cada contaminante, sobre la base de los volúmenes de tránsito anuales, distancias recorridas, velocidades medias de funcionamiento y mezcla de flota representativa.
- b) Para el enfoque avanzado, la resolución temporal debería tener en cuenta estimaciones o medidas de las variaciones diarias u horarias de las condiciones de tránsito (por ejemplo, períodos pico matutinos y vespertinos) y mezcla de flota (véase flota de vehículos y composición).
- c) Para el enfoque sofisticado, la resolución temporal debería utilizar perfiles de pendientes del tiempo para proporcionar mezclas de flota horarias en todos los caminos del estudio que se considere introducen contribuciones importantes al inventario.

#### **Flota de vehículos y composición**

2.9 Como se señaló anteriormente, las categorías de vehículos motorizados normalmente incluidas en un inventario de emisiones relacionadas con un aeropuerto comprenden los automóviles de pasajeros y las camionetas, los camiones ligeros y pesados, autobuses, taxis y otros vehículos motorizados. Pueden prepararse por separado inventarios para los vehículos de la parte pública y de la parte aeronáutica. Las emisiones de los vehículos de la parte pública también pueden categorizarse de modo que las emisiones se separen según tipo de camino o de instalación (vías de acceso, estacionamiento de vehículos, terminales de pasajeros, aceras, etc.). Por lo general, cada tipo de vehículo puede definirse mediante una de estas cuatro categorías:

- a) automóviles de pasajeros;
- b) otros vehículos ligeros (por ejemplo, taxis, camionetas, limosinas);
- c) vehículos pesados (incluyendo autobuses urbanos y de larga distancia); y
- d) vehículos de dos ruedas (motonetas y motocicletas).

2.10 Dentro de estas categorías, existe una amplia diversidad de tipos y edades de los vehículos, tipos de combustible y característica del funcionamiento. Por esta razón, las categorías indicadas anteriormente suelen clasificarse en subcategorías según tamaño y tipo de vehículo, nivel de control de emisiones, tipo de combustible, tipo de motor y finalidad operacional.

2.11 Análogamente, los autobuses urbanos y de larga distancia pueden colocarse en una categoría separada si se dispone de factores de carga operacionales y de emisiones adecuados. Como se señaló anteriormente, los vehículos de la parte aeronáutica requerirán cuidadosa atención para evitar contabilizar dos veces el tránsito relacionado con vehículos de la parte pública y algunos GSE.

2.12 Las alternativas para obtener datos correspondientes a la mezcla de flotas de vehículos se resumen como sigue:

- a) El enfoque simple obtiene datos de vehículos a partir de bases de datos nacionales disponibles sobre promedios de mezclas de flotas de vehículos o edad de los mismos. El enfoque avanzado también puede obtener datos de vehículos a partir de registros nacionales, pero la mezcla o edad de la flota normalmente refleja la que funciona en el aeropuerto. Cabe señalar que en el marco del enfoque avanzado la mezcla de flotas de vehículos también puede definirse utilizando perfiles de pendientes del tiempo para distintos segmentos de ruta (por ejemplo, para incluir aumentos matutinos o vespertinos del número de automóviles privados y autobuses cuando el personal aeroportuario llega y sale).
- b) El enfoque sofisticado puede emplear técnicas para medir el tipo y la edad reales de los vehículos – ya sea como datos de fuente para el estudio o para validar datos nacionales. La aplicación de datos medidos en el contexto aeroportuario puede resultar atractiva dado que los datos nacionales pueden no representar la edad típica de los vehículos que utilizan los caminos en el estudio. Un ejemplo de esta técnica utiliza registros vídeos de placas de matrícula de vehículos y su correlación con los registros matriculares para proporcionar valores exactos del tipo de vehículo o motor, tipo de combustible y edad. La clasificación del tránsito de vehículos debería efectuarse con arreglo a los pasajeros, personal aeroportuario, mantenimiento, construcción y carga.

### **Velocidad media y colas**

2.13 Según se analizó anteriormente, los enfoques alternativos para calcular las emisiones de vehículos proporcionados en esta orientación se basan en la velocidad media como dato de entrada para el análisis. Las colas de vehículos son un caso especial caracterizado por velocidades medias muy lentas y pueden incluir emisiones por evaporación durante la marcha lenta. Ambas condiciones se tratan como sigue:

- a) El enfoque simple puede utilizar una velocidad media general. Las emisiones de las colas pueden factorearse como coeficiente del tránsito total.
- b) El enfoque avanzado exige una estimación de la velocidad media para cada segmento carretero conjuntamente con perfiles de tiempos de cola para los principales segmentos donde se registren demoras.
- c) El enfoque sofisticado puede aumentar los datos utilizados para el enfoque avanzado mediante datos medidos. No obstante, deberían definirse aún más los segmentos de carretera para obtener velocidades medias específicas de los segmentos. Para cada segmento puede definirse la velocidad media de cada categoría de vehículo. Deberían asignarse tiempos de cola de tránsito a los segmentos separados.

### **Fin de viaje y otros parámetros de tránsito**

2.14 Las emisiones de fin de viaje son las emisiones relacionadas con el “arranque en frío” que ocurren al comienzo de un viaje, las emisiones de “parada caliente” similares que ocurren al final de un viaje una vez que se ha apagado el motor del vehículo y las emisiones de evaporación (en su mayoría VOC) del sistema de combustible durante

el uso y cuando el vehículo está estacionario. Estas emisiones de vehículo se contabilizan como emisiones adicionales y principalmente se aplican a los parques de estacionamiento y aceras fuera de las terminales aeroportuarias.

### Otras emisiones de vehículos

2.15 Otras emisiones de vehículo comprenden emisiones de materia particulada (es decir  $PM_{10}$ ) de los vehículos carreteros que no corresponden al motor y que ocurren como resultado de la aplicación de los sistemas de frenado y del desgaste de neumáticos, el desgaste de la superficie carretera y la resuspensión de partículas previamente depositadas. La distribución espacial de estas fuentes fugitivas de emisiones será relativamente constante y coherente con el diseño de la red carretera. No obstante, habrá aumentos donde ordinariamente se registra el mayor volumen de tránsito de parada y arranque, como a cada lado de las líneas de parada en las intersecciones de caminos y en las esquinas. Pueden ocurrir variaciones temporales con carácter diurno y estacional debido a que las características de los caminos y de conducción varían según la densidad del tránsito y las condiciones de las carreteras.

2.16 El enfoque simple no considera las emisiones fugitivas.

2.17 El enfoque avanzado puede incluir valores para zonas de mucho tránsito, intersecciones importantes y sitios de construcción. La red carretera debería dividirse para asignar un valor por defecto a cada segmento.

2.18 El enfoque sofisticado comprende emisiones de fin de viaje y ajenas a motores sobre la base de los segmentos carreteros y desglosa los datos para mostrar inventarios separados de vehículos del personal y de los pasajeros.

## 3. FACTORES DE EMISIÓN DE LOS VEHÍCULOS

3.1 Para los vehículos carreteros, los factores de emisión representan las cantidades unitarias de un contaminante emitido cuando el vehículo recorre el largo de un camino (normalmente expresado como gramos o miligramos por kilómetro) o cuando el vehículo tiene su motor funcionando en marcha lenta durante un determinado período de tiempo (normalmente expresado como gramos o miligramos por minuto).

3.2 Los factores de emisión del tránsito se obtienen a partir de modelos computarizados y otras bases de datos específicamente diseñados para generar tales factores. Estos recursos proporcionan factores de emisión de vehículos locales que varían en función de la temperatura ambiente, la velocidad del recorrido, el modo de funcionamiento del vehículo (por ejemplo, marcha lenta, crucero, desaceleración, aceleración, arranque en caliente y estabilizado), el tipo y la volatilidad del combustible, la tecnología del vehículo, su edad, la condición de inspección o mantenimiento y el régimen de incremento del kilometraje (km/año).

3.3 Normalmente, para los modelos de velocidad media, se utilizan factores de emisión para calcular un factor de emisión total para un segmento de camino (g/km) para cada clase de vehículo que utiliza el mismo y para una velocidad media. En el caso de los terrenos de estacionamiento, también se emplean factores de emisión expresados en g/suceso, como el arranque en frío. En el enfoque sofisticado, los factores de emisión pueden variar con la hora del día/semana sobre la base de factores climatológicos locales.

3.4 Para los vehículos relacionados con el aeropuerto, la siguiente fuente proporcionó factores de emisión:

- a) EPA MOVES de Estados Unidos;
- b) EMFAC2011 de California;

- c) Método CITEPA<sup>2</sup> basado en COPERT4;
- d) Método ALAQS de EUROCONTROL basado en COPERT4; y
- e) Método LASPORT basado en el manual de factores de emisión para el transporte por carretera Handbook *Emission Factors for Road Transport* (HBEFA).

#### 4. VARIACIONES DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS MODELOS

4.1 Los modelos de emisiones de vehículos mencionados en 3.4 se proporcionan como fuentes de factores de emisión de vehículos carreteros actuales y futuros, pero se diseñaron originalmente con la finalidad de vigilar los efectos de la legislación sobre calidad del aire local o nacional (MOVES, CITEPA). Estos modelos estiman un número de contaminantes de escapes incluyendo CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM (en algunos casos, también número de partículas), SO<sub>x</sub>, HAP seleccionado y CO<sub>2</sub>. También se proporcionan en muchos casos emisiones de evaporación de combustible y emisiones de PM de desgaste de frenos y neumáticos.

4.2 Los contaminantes pertinentes a las emisiones de vehículos carreteros se dividen en grupos legislado y no legislado. Las especies de contaminantes normalmente modelizadas se muestran en las Tablas 3-A4-1 y 3-A4-2. Al seleccionar un modelo es importante observar que algunos modelos de emisiones de vehículos notificarán los contaminantes en forma diferente; por ejemplo, algunos pueden proporcionar un desglose de hidrocarburos y contaminantes volátiles mientras que otros podrían agruparlos como un solo contaminante. Entre otros contaminantes que no están incluidos, puede tener que calcularse el plomo si todavía se utiliza combustible con plomo y si se dispone de un factor de emisión para el mismo.

4.3 En la Tabla 3-A4-1 se indican los contaminantes que son objeto de legislación sobre calidad del aire en uno o más Estados.

4.4 Algunos modelos pueden notificar un conjunto ampliado de contaminantes si se dispone de los índices apropiados según se muestra en la Tabla 3-A4-2.

**Tabla 3-A4-1. Conjunto básico de contaminantes — legislado**

Contaminante	Observaciones
CO	
HC	Algunos modelos pueden proporcionar resultados por contaminante componente — véase conjunto ampliado de contaminantes a continuación.
NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> + NO)	Algunos modelos pueden notificar por separado NO <sub>2</sub> y NO.
SO <sub>x</sub>	
PM <sub>10</sub>	
PM <sub>2.5</sub>	Puede estar incluida en el informe sobre PM <sub>10</sub> .

2. Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (Centro Técnico Interprofesional de Estudios sobre la Contaminación Atmosférica), (CITEPA), Francia

Tabla 3-A4-2. Conjunto ampliado — no legislado

Contaminante	Observaciones
1.3-butadieno	
Acetaldehído	
Acroleína	
Benceno	
CO <sub>2</sub>	La mayoría de los modelos calcularán el quemado de combustible (dado que puede obtenerse CO <sub>2</sub> ) pero, debido a que el CO <sub>2</sub> no es un gas LAQ, se incluye en el conjunto ampliado.
CH <sub>4</sub>	
Cu	
CHCO	
HCB	Puede estar incluido en HC.
N <sub>2</sub> O	
NH <sub>3</sub>	
MTBE	
PAH : BaP, BbF, BkF, IndPy	Puede estar incluido en HC.
PCDD-F	Puede estar incluido en HC.
TSP	

## 5. CÁLCULOS

5.1 En esta sección, se analizan los tres enfoques (simple, avanzado y sofisticado) y se presentan fórmulas que pueden aplicarse para obtener estimaciones de las emisiones totales de los vehículos que funcionan en los caminos relacionados con el aeropuerto, terrenos de estacionamiento y aceras.

5.2 Aunque existen muchos métodos diferentes para el cálculo de emisiones de vehículos, los tres enfoques presentados en esta orientación se basan en el método de “velocidad media de vehículo” porque es el más apropiado al contexto aeroportuario. No obstante, la elección final del método de cálculo dependerá del alcance del inventario y de los datos de entrada disponibles.

5.3 La selección de un enfoque de cálculo depende de la finalidad del análisis y de la complejidad de los datos de entrada disponibles para el estudio.

- a) **Simple.** Adecuado para lo que podría denominarse enfoque “de arriba a abajo”. El enfoque simple reúne las emisiones totales del número total de kilómetros-vehículo recorridos en la longitud total de todos los caminos dentro de un área definida de estudio utilizando datos de mezcla de flota nacionales publicados, año de referencia y kilometraje medio anual para cada clase de vehículo.
- b) **Avanzado.** Aplicando el enfoque avanzado, los segmentos de caminos se definen individualmente según longitud, velocidad media y mezcla de flota. Pueden utilizarse perfiles de actividad para describir la afluencia diurna (por ejemplo, variación temporal) del tránsito en cada segmento de carretera.

- c) **Sofisticado.** El enfoque sofisticado requiere la mayoría de los datos (enfoque “de abajo a arriba”). Las emisiones se reúnen según segmento de camino por hora y son calculadas en forma independiente para el número real (por ejemplo, medido) de vehículos de cada tipo que recorren el segmento en cuestión, conjuntamente con su edad y detalles de motor. Pueden incluirse detalles completos de la red caminera incluyendo pendientes y características de la superficie de los caminos. Luego pueden sumarse las emisiones del tránsito de cada segmento carretero durante el período de interés (es decir una hora, una semana y un año).

### Enfoque simple

5.4 Para fines de demostración, las estimaciones de emisiones aplicando el enfoque simple pueden calcularse por medio de la siguiente ecuación general:

$$E = RL \times NV \times EF \quad \text{Ec. 3-A4-1}$$

donde:

E = emisiones (por ejemplo, gramos);

RL = longitud del camino (por ejemplo, kilómetros);

NV = número de vehículos en el camino por clase, edad y velocidad; y

EF = factor de emisión considerando clase, edad y velocidad de los vehículos (por ejemplo, gramos/kilómetro-vehículo recorrido).

5.5 Aplicando esta fórmula, el siguiente ejemplo calcula el nivel de emisiones utilizando el enfoque simple. Se supone un camino de 5 kilómetros de longitud. En un período de 24 horas, 100 000 vehículos recorren el camino a una velocidad media de 35 kilómetros por hora. La mezcla de flota de vehículos consiste en un 80% de automóviles de pasajeros, 10% de vehículos ligeros, 5% de vehículos pesados y 5% de vehículos de dos ruedas. Además, para el período de interés, (por ejemplo, 24 horas) la temperatura media es de 21° Celsius. Suponiendo que el factor de emisión de CO es de 30 gramos por kilómetro, las emisiones de CO totales de la carretera se calculan como sigue:

$$5 \text{ kilómetros} \times 100 \text{ 000 vehículos} \times 30 \text{ gramos por kilómetro} = \\ 15 \text{ 000 000 gramos de CO (es decir 15 toneladas métricas).}$$

### Enfoque avanzado

5.6 Para fines de demostración, las estimaciones de emisiones de conducción urbana utilizando el enfoque avanzado pueden calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$E_{\text{total}} = (RL_1 \times NV_1 \times EF_1) + (RL_2 \times NV_2 \times EF_2) + (RL_n \times NV_n \times EF_n) \quad \text{Ec. 3-A4-2}$$

donde:

$E_{\text{total}}$  = total de emisiones para todos los segmentos de carretera (por ejemplo, gramos);

$RL_{1..n}$  = longitud de la carretera (por ejemplo, kilómetros);

$NV_{1..n}$  = número de vehículos en la carretera por clase, edad y velocidad; y

$F_{1..n}$  = factor de emisión considerando clase, edad y velocidad del vehículo (por ejemplo, gramos/kilómetro-vehículo recorrido).

5.7 Aplicando esta fórmula, el ejemplo siguiente calcula el nivel de emisiones utilizando el enfoque avanzado. Se supone que dentro de un área de estudio definida existen dos carreteras. Una tiene 2,4 kilómetros de longitud y la otra, 2,6 kilómetros de longitud. En un período de 24 horas, 60 000 vehículos recorren la carretera más corta y 40 000 vehículos recorren la más larga. La velocidad media de recorrido en cada carretera es de 35 kilómetros por hora.

5.8 En la carretera más corta, la mezcla de flota de vehículos consiste en 80% de vehículos de pasajeros, 10% de vehículos livianos, 5% de vehículos pesados y 5% de vehículos de dos ruedas. En la carretera más larga, la mezcla de flota de vehículos consiste en 75% de automóviles de pasajeros, 15% de vehículos ligeros y 10% de vehículos pesados. Para el período de interés (24 horas), la temperatura media es de 21° Celsius.

5.9 Suponiendo que el factor de emisión de CO para la carretera más corta es de 30 gramos por kilómetro y que el factor de emisión de CO para la carretera más larga es de 35 gramos por kilómetro, las emisiones de CO totales para los segmentos de carretera se calculan como sigue:

$$(2,4 \text{ kilómetros} \times 60 \text{ 000 vehículos} \times 30 \text{ gramos por kilómetro}) + (2,6 \text{ kilómetros} \times 40 \text{ 000 vehículos} \times 35 \text{ gramos por kilómetro}) = 7 \text{ 960 000 gramos de CO (es decir 7,96 toneladas métricas).}$$

### Enfoque sofisticado

5.10 La fórmula para el enfoque avanzado también se utilizaría para el enfoque sofisticado como se demuestra en el ejemplo siguiente (siendo la única diferencia la cantidad y el alcance de los datos requeridos).

5.11 Supongamos que durante la hora pico matutina de un día, 5 000 vehículos recorren un camino de 1,5 kilómetros de longitud y, durante la hora pico vespertina, recorren el mismo camino 7 000 vehículos. Para cada una de las horas de día restantes, recorre ese camino el 25% del tránsito de hora pico matutina (1 250 vehículos).

5.12 La velocidad de recorrido media en el camino durante la hora pico matutina es de 45 kilómetros por hora y la velocidad media de recorrido sobre el camino durante la hora pico vespertina es de 30 kilómetros por hora. Aunque el volumen y velocidad fluctúan, la mezcla de flota de vehículos permanece constante durante los días de semana en un 80% de automóviles de pasajeros, 10% de vehículos ligeros, 5% de vehículos pesados y 5% de vehículos de dos ruedas. Los fines de semana, las relaciones cambian a 80% de automóviles de pasajeros, 10% de vehículos ligeros, 8% de vehículos pesados y 2% de vehículos de dos ruedas. Del 80% de automóviles durante los días de semana, el 40% corresponden a personal que llega a trabajar y el 60% a pasajeros.

5.13 Durante la hora pico matutina, la temperatura media es de 4°C y la durante la hora pico vespertina la temperatura media es 21°C. En todas las demás horas del día, la temperatura se mantiene en 10°C.

5.14 Suponiendo que el factor de emisión de CO ponderado (teniendo en cuenta la mezcla de flota y el tipo, edad y combustible del vehículo) durante la hora pico matutina es de 30 gramos por kilómetro, el factor durante la hora pico vespertina es de 20 gramos por kilómetro, y el factor de emisión del resto de las horas del día es de 25 gramos por kilómetro, las emisiones de CO totales de los segmentos de carretera se calculan como sigue:

$$(1,5 \text{ kilómetros} \times 5 \text{ 000 vehículos} \times 30 \text{ gramos por kilómetro}) + (1,5 \text{ kilómetros} \times 7 \text{ 000 vehículos} \times 20 \text{ gramos por kilómetro}) + (22 \text{ horas} \times (1,5 \text{ kilómetros} \times 1 \text{ 250 vehículos} \times 25 \text{ gramos por kilómetro})) = 1 \text{ 466 250 gramos de CO (es decir 1,47 toneladas métricas).}$$

5.15 Este ejemplo considera un segmento de carretera. Este cálculo tendría que haberse repetido para todos los segmentos de carretera teniendo en cuenta la mezcla de flota, velocidades, etc. Finalmente, en el ejemplo el factor de emisión se supone constante para cada segmento de carretera. La aplicación del enfoque sofisticado supone que las variaciones diurnas y estacionales son constantes.



### Aceras/banquetas y terrenos de estacionamiento

5.16 Con una excepción, las fórmulas y enfoques analizados anteriormente para nuevas carreteras también pueden utilizarse para estimar las emisiones de los vehículos detenidos con motor en marcha lenta en las aceras/banquetas del aeropuerto y viajando o detenidos en marcha lenta en las instalaciones de estacionamiento relacionadas con el aeropuerto (por ejemplo, garajes y terrenos de superficie). En lugar de los factores de emisión basados en las distancias, estos son factores basados en el tiempo o en los sucesos y representan arranques en caliente y en frío, parada en caliente (marcha lenta del motor en la banqueta) y emisiones de evaporación.

5.17 Para fines de demostración, las estimaciones de emisiones para vehículos en marcha lenta en las aceras/banquetas y viajando o en marcha lenta en los terrenos de estacionamiento pueden calcularse utilizando la siguiente ecuación general:

$$E_{total} = (TD_m \times NV_m \times EF_m) + (T \times NV_l \times EF_l) \quad \text{Ec. 3-A4-3}$$

donde:

$E_{total}$  = emisiones totales correspondientes a todos los vehículos en movimiento y en marcha lenta (por ejemplo, gramos);

$TD_m$  = distancia recorrida (por ejemplo, kilómetros);

$NV_m$  = número de vehículos en el camino, por clase, edad y velocidad;

$EF_m$  = factor de emisión para vehículos móviles (en movimiento) considerando clase, edad y velocidad de los vehículos (por ejemplo, gramos/kilómetro-vehículo recorrido);

$T$  = tiempo de permanencia (por ejemplo, minutos) en que el vehículo está estacionario;

$NV_l$  = número de vehículos en marcha lenta por clase, edad y velocidad; y

$EF_l$  = factor de emisión en marcha lenta considerando clase, edad y velocidad de vehículo (por ejemplo, gramos/minuto).

5.18 Utilizando esta forma, el ejemplo siguiente calcula el nivel de emisiones para una acera/banqueta aplicando el enfoque simple. Se supone una acera de 0,2 kilómetros de longitud. En un período de 24 horas, 2 000 vehículos atraviesan el camino adyacente a la acera a una velocidad media de 25 kilómetros por hora. La mezcla de flota de vehículos consiste en 95% de vehículos de pasajeros y 5% de vehículos ligeros. Mientras los conductores cargan o descargan el equipaje de pasajeros, cada vehículo permanece detenido 2 minutos en marcha lenta. La temperatura media diaria es de 21° Celsius. Suponiendo un factor de emisiones de CO en movimiento de 30 gramos por kilómetro (el correspondiente factor de emisión para la velocidad del vehículo de 25 kilómetros por hora) y un factor de emisión de CO en marcha lenta de 4 gramos por minuto, las emisiones totales de CO de la acera se calculan como sigue:

$$(0,2 \text{ kilómetros} \times 2\,000 \text{ vehículos} \times 30 \text{ gramos por kilómetro}) + (2 \text{ minutos} \times 2\,000 \text{ vehículos} \times 4 \text{ gramos por minuto}) = 28\,000 \text{ gramos de CO (es decir 0,028 toneladas métricas)}.$$

— — — — —

## Adjunto A al Apéndice 4

### REFERENCIAS DE LOS MODELOS DE VEHÍCULOS

La Oficina de Transporte y Calidad del Aire (OTAQ) de la EPA desarrolló el simulador de emisiones de vehículos automotores MOVES (*MOtor Vehicle Emission Simulator*). Este nuevo sistema de modelización de emisiones calcula las emisiones para las fuentes móviles y abarca una amplia gama de contaminantes; también permite realizar un análisis de escalas múltiples. MOVES actualmente calcula las emisiones de automóviles, camiones y motocicletas. Está disponible en el sitio <http://www.epa.gov/otaq/models/moves/index.htm> (junio de 2020).

EMFAC es la herramienta de inventarios de emisiones de fuentes móviles que utiliza la Junta de Recursos Aéreos de California (*California Air Resources Board* - CARB) para evaluar la población, la actividad y las emisiones de fuentes móviles. La CARB lanzó EMFAC2011, que es su modelo oficial para calcular emisiones de automóviles, camiones y autobuses que circulan por las carreteras en California. La herramienta puede conseguirse en el sitio <https://arb.ca.gov/emfac/2011/> (junio de 2020).

COPERT 4 es un programa de Microsoft Windows que se utiliza para calcular las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes del transporte por carretera. La metodología COPERT 4 es totalmente compatible con la sección sobre el transporte por carretera de la guía *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2019*. El uso de una herramienta de *software* para calcular emisiones del transporte por carretera permite aplicar un procedimiento transparente y normalizado y, por consiguiente, uniforme y comparable para la recopilación de datos y la notificación de emisiones, que cumple con los requisitos de los convenios y protocolos internacionales, así como con la legislación de la UE. La información pertinente está disponible en <http://copert-4.software.informer.com/8.0/> (junio de 2020).

El manual de factores de emisión para el transporte por carretera *Handbook Emission Factors for Road Transport* (HBEFA) proporciona factores de emisión para todas las categorías de vehículos actuales (automóviles de pasajeros, vehículos livianos, vehículos pesados para el transporte de mercancías, autobuses urbanos, ómnibus y motocicletas). Cada categoría de vehículos se divide en subcategorías correspondientes una amplia variedad de situaciones de tránsito. Se incluyen los factores de emisión para todos los contaminantes reglamentados y los contaminantes no reglamentados más importantes, así como el consumo de combustible y el CO<sub>2</sub>. La herramienta está disponible en [www.hbefa.net](http://www.hbefa.net) (visitado en junio de 2020).



## Capítulo 4

# DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS EMISIONES

### 4.1 INTRODUCCIÓN

4.1.1 En los aeropuertos, las emisiones se producen en diversos lugares y períodos de tiempo dependiendo de la finalidad y características operacionales de la fuente. Por ejemplo, las fuentes estacionarias como los generadores o las plantas térmicas emiten desde lugares fijos y pueden tener carácter continuo o intermitente. Comparadas con ellas, las emisiones de las aeronaves tienen un carácter más móvil, suceden en diversos lugares del aeropuerto, horas del día y con diversas intensidades. Las emisiones de las aeronaves generadas durante el despegue y el aterrizaje también tienen lugar fuera del aeropuerto y hasta la altura de mezcla local, que a menudo se supone es de 1 000 metros o 3 000 ft. Esto hace que la dispersión de las emisiones no sólo sea una distribución temporal sino también una distribución espacial en tres dimensiones.<sup>1</sup> Normalmente otras fuentes móviles se limitan a un área general pero se mueven dentro del área y varían con la hora del día. La evaluación de esta variabilidad de lugar y densidad de emisiones debe hacerse mediante una distribución temporal y espacial de las mismas. Esto es especialmente cierto si se ha de realizar una modelización de la dispersión como parte del análisis general de la calidad del aire. Dependiendo de la configuración de la fuente del modelo de dispersión (por ejemplo, punto, línea, volumen o área) puede requerirse diferentes tipos de información para la distribución de las emisiones. En este capítulo se describe el proceso de distribución de las emisiones que tiene lugar en las inmediaciones de los aeropuertos.

4.1.2 En resumen, los objetivos de la evaluación de la distribución de las emisiones relacionadas con el aeropuerto comprenden:

- a) determinación de las densidades espaciales (ubicación) de las emisiones;
- b) determinación de las emisiones temporales (hora del día y tiempo total de liberación);
- c) evaluación de áreas del aeropuerto que comprenden contaminantes específicos;
- d) determinación de las áreas más problemáticas en los terrenos del aeropuerto; o
- e) elaboración de datos de entrada para los modelos de dispersión.

4.1.3 El proceso de la distribución de las emisiones se relaciona estrechamente con el proceso general de inventario de las emisiones y la modelización de la dispersión, de realizarse ésta. En consecuencia, se harán frecuentes referencias al Capítulo 3, más que repetir la información en éste.

4.1.4 La distribución de las emisiones puede tener lugar a horas diferentes durante el análisis de la calidad del aire en los aeropuertos o puede no hacerse en absoluto. Por ejemplo, algunos aeropuertos realizan esta labor a medida que completan el inventario de emisiones, combinando ambas actividades. Otros aeropuertos no completan la distribución de las emisiones hasta no iniciarse el modelo de dispersión. La razón de ello es que el inventario de emisiones comprende la masa total de todo el aeropuerto, desglosada por fuente y tipo de contaminante, y eso puede ser todo lo que se requiera. Otra opción es que un inventario atribuido ubique las emisiones en forma temporal y espacial, proporcionando información

---

1. Cabe señalar que el término "atribución" se utiliza a menudo durante los análisis aeroportuarios en vez del término "distribución". No obstante, la atribución en el sentido global puede tener un significado diferente y por ello no se utiliza en este documento.

adicional que puede emplearse para análisis de tendencias, datos de entrada a los modelos de dispersión o para mitigación de la distribución de las emisiones. Los datos detallados necesarios para este análisis quizás no estén disponibles durante el inventario de emisiones inicial, lo que puede demorar la realización del trabajo.

4.1.5 En general, la distribución de las emisiones relacionadas con el aeropuerto involucra los pasos siguientes:

- a) definir la finalidad de la distribución (por ejemplo, densidad de las emisiones, variabilidad de las emisiones o modelo de dispersión);
- b) recoger información específica de la fuente, especial y temporal con carácter detallado;
- c) aplicar la garantía de calidad a los datos espaciales y temporales;
- d) atribuir fuentes por área específica, hora del día y duración de la operación;
- e) crear inventarios de las emisiones según se describe en el Capítulo 3 por fuente, área y hora del día; y
- f) reunir y comunicar los resultados.

4.1.6 Si los datos se han de aplicar finalmente a la modelización de la dispersión, entonces el enfoque para evaluar la distribución espacial y temporal de las emisiones está a menudo regido por los requisitos del modelo de dispersión y los datos meteorológicos conexos. Normalmente, las concentraciones en la salida del modelo de dispersión deberán mostrar medias anuales, de ocho y de 24 horas con el número de veces en que se exceden los límites en dichos intervalos de tiempo según se analiza en 4.2.4 a 4.2.6 del presente capítulo. Debería también requerirse que la representación geoespacial sea compatible con una evaluación regional o nacional y se requiere cautela para determinar la base correcta de modo de que no ocurra demoras.

## 4.2 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS EMISIONES

4.2.1 Dado que la distribución de las emisiones determina la representación espacial de éstas, la primera tarea consiste en recoger datos operacionales e información sobre lugares para cada fuente del aeropuerto o en sus cercanías. Las especies típicas de contaminantes de las fuentes de emisiones aeroportuarias se analizaron ya en el Capítulo 3, sección 3.3, y las fuentes se describieron en el Capítulo 3, sección 3.4. La distribución de las emisiones se realiza a menudo conjuntamente con la recolección inicial de datos para el inventario de emisiones según se describió anteriormente en el Capítulo 3, pero no siempre es así. La razón de realizar la distribución de las emisiones como tarea separada es que, para un inventario de emisiones, el lugar y la hora de liberación no tienen importancia y la labor puede realizarse sin distribución. Por ello, la distribución puede realizarse en un momento posterior si se necesita. En algunos lugares, como en los Estados Unidos, un inventario general de emisiones puede ser todo lo que se necesita a menos que ocurran aumentos en las emisiones o haya de emprenderse una actividad importante (por ejemplo, un nuevo aeropuerto, pista o calle de rodaje). En estos casos, a veces se necesita construir modelos de dispersión y la distribución de las emisiones se realiza en general conjuntamente con la tarea de modelizar la dispersión. Si se sabe que se necesitará la distribución a medida que se realiza el inventario de las emisiones es en general más eficaz realizar esta labor como parte de la tarea original.

4.2.2 La información adicional necesaria para la distribución espacial y temporal puede variar considerablemente según el aeropuerto. Por ejemplo, el tiempo de rodaje de una aeronave depende de las configuraciones de las pistas y calles de rodaje, longitudes de las colas, configuraciones de las puertas y tipos de aeronave. Debido a que la mayoría de las características operacionales y de performance de los aeropuertos difieren según éstos, el tiempo en el modo de rodaje también variará y deberá determinarse caso por caso. La mejor práctica comprende utilizar datos específicos del aeropuerto siempre que sea posible (es decir, utilizar el tiempo de rodaje real para cada movimiento). Los horarios de los aeropuertos también varían, lo que resulta en períodos de tiempo en los cuales las emisiones que realmente ocurren son diferentes. Esto, a su vez, hace que se necesite recoger datos para cada aeropuerto, aunque pueden utilizarse en algunos casos procedimientos e hipótesis simplificadas.

4.2.3 El proceso de recolección de datos exige a menudo que el analista de la calidad del aire establezca contactos con varias entidades para obtener la información necesaria. En las Tablas 4-1 y 4-2 se indican posibles entidades para obtener esta información, según el tipo de fuente de emisión. En la medida posible, los datos deben ser específicos de una hora y un lugar para un día típico en cuanto a las operaciones. También ocurren variaciones en estos parámetros, pero a veces son difíciles de cuantificar, lo que lleva a que se analice con más frecuencia la evaluación de las condiciones “típicas” o “de día promedio”. En algunos aeropuertos también ocurren variaciones estacionales que deben tenerse en cuenta.

4.2.4 Cada fuente de emisiones se atribuye a un período de tiempo específico por cada lugar en el aeropuerto. El uso de períodos de una hora en lugar de un día típico de 24 horas es el más frecuente debido a los requisitos de modelización de la dispersión. La fuente puede no funcionar durante toda la hora y, en caso de fuentes móviles, puede cambiar de lugar en el aeropuerto. Esto debe tenerse en cuenta durante la distribución y puede efectuarse atribuyendo las emisiones que utilizan fracciones del período de estimación o mediante factores. Cualquiera sea el método aplicado se obtendrá el mismo resultado.

**Tabla 4-1. Fuentes de datos espaciales para la distribución de las emisiones**

Fuente de las emisiones	Posible entidad para obtener información
Geometría de pistas, calles de rodaje, puertas en el aeropuerto	Mapas Ortofotos Planos del aeropuerto (ALP) Archivos de los sistemas de información geográfica (GIS) Estudios sobre el terreno
Fuentes estacionarias	Mapas Ficheros GIS Ortofotos Oficina de operaciones del aeropuerto Explotadores con base fija Oficina de operaciones de mantenimiento Estudios sobre el terreno
Fuentes móviles de la parte aeronáutica	Plan general Informes sobre ruido Oficina de operaciones del aeropuerto Oficina de operaciones de mantenimiento Estudios sobre el terreno Compañías/agentes de servicios de escala
Fuentes móviles de la parte pública	Plan general Informes sobre ruido Oficina de operaciones del aeropuerto Oficina de operaciones de mantenimiento Estudios sobre el terreno Autoridades regionales
Fuentes no estándar	Plan general Oficina de operaciones del aeropuerto Oficina de operaciones de mantenimiento Oficina de seguridad operacional del aeropuerto Seguridad aeroportuaria Encuestas de explotadores con base fija Estudios sobre el terreno

**Tabla 4-2. Fuentes de datos temporales para la distribución de las emisiones**

Fuente de las emisiones	Posible entidad para obtener información
Fuentes estacionarias	Plan general Informes sobre ruido Planes/antecedentes de suministro de combustible Registros de uso de combustible Oficina de operaciones del aeropuerto Oficina de mantenimiento del aeropuerto Encuestas de explotadores con base fija
Aeronaves	Información sobre los horarios de las líneas aéreas; horarios del aeropuerto Registros de remolque Líneas aéreas Horarios de carga Informes sobre ruido Observaciones
Fuentes móviles de la parte aeronáutica	Horarios de aeronaves Líneas aéreas Proveedores de servicios Plan general Oficina de operaciones del aeropuerto Oficina de operaciones de mantenimiento Observaciones Compañías de servicios de escala
Fuentes móviles de la parte pública	Plan general Horarios de transporte y tránsito público Registros de estacionamientos Horarios de empleados Horarios de carga Registros de tránsito carretero Límites de velocidad Mediciones de la velocidad en las carreteras Oficina de operaciones del aeropuerto Oficina de mantenimiento del aeropuerto Seguridad aeroportuaria Observaciones/Estudio sobre el terreno
Fuentes no estándar	Plan general Oficina de operaciones de aeropuerto Oficina de operaciones de mantenimiento Oficina de seguridad operacional en el aeropuerto Seguridad aeroportuaria Encuestas de explotadores con base fija Estudios sobre el terreno

4.2.5 Cuando la finalidad es solo la distribución de las emisiones, éstas se atribuyen a zonas o cuadrículas de actividad para cada incremento de tiempo seleccionado. Las áreas o cuadrículas definidas dependerán de la fuente y de su zona de funcionamiento típica (es decir los remolcadores empleados para las maniobras de empuje de aeronaves tienden a permanecer en áreas específicas en torno a las puertas de la terminal). Los resultados finales pueden ser por hora, día, semana, mes o año; sin embargo, como se señaló anteriormente, el intervalo más empleado es el de una hora debido a las necesidades de ingreso de datos para los modelos de dispersión. El resultado final puede entonces aplicarse a la estimación de los cambios de densidad de las emisiones en el aeropuerto, análisis de zonas más problemáticas, variabilidad de las emisiones o comparación de tendencias.

4.2.6 Cuando la finalidad es la modelización de las dispersiones, los datos de entrada requeridos para el modelo de dispersión determinan dónde se atribuyen las emisiones. La práctica común consiste en predecir concentraciones de una hora para determinar la peor hora del día o el mayor período de horas consecutivo dependiendo del contaminante y los reglamentos aplicables. Esto proporciona concentraciones ambientales locales que pueden utilizarse para determinar consecuencias sobre la salud o el bienestar públicos. Como se señaló anteriormente, los períodos de tiempo más comunes son de una hora, ocho horas, 24 horas y un año. En los aeropuertos de la UE, la legislación exige el número de sucesos de niveles de concentración (a lo largo de varios lapsos de tiempo como se expresó anteriormente; por ejemplo, 24 horas/ocho horas/una hora promedio) por año. Cuando esto ocurre durante la modelización de la dispersión, deberá tenerse en cuenta.

### 4.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL<sup>2</sup>

4.3.1 El proceso general analizado en el Capítulo 3 sigue teniendo aplicación aquí. La diferencia consiste en que el inventario general se divide en inventarios más pequeños específicos de un lugar particular. Como lo señala la EPA de los Estados Unidos, “[d]ebido a que la modelización de la calidad del aire trata de reproducir los procesos físicos y químicos reales que ocurren en un dominio de inventario de emisiones, es importante que la ubicación física de las emisiones se determine con tanta exactitud como sea posible. En una citación ideal, la ubicación física de todas las emisiones se conocería exactamente. En la realidad, no obstante, la atribución especial de las emisiones en un inventario de modelización sólo se aproxima al emplazamiento real de las mismas”. La aproximación requerida no es solo un problema en Estados Unidos, sino que ocurre en todos los aeropuertos. Esto es especialmente cierto para los aeropuertos donde las actividades varían día por día. No obstante, la densidad espacial de las emisiones todavía puede determinarse para el promedio general. El proceso comienza decidiendo cuáles son las áreas, celdas o zonas donde han de atribuirse las emisiones, dependiendo del propósito deseado de los resultados y de los requisitos del modelo aplicado. El tamaño de las áreas, celdas o zonas es también función del área operacional de la fuente, como se mencionó anteriormente. La distribución puede efectuarse estableciendo una serie de celdas de forma similar sobre el aeropuerto o determinando áreas de actividad para cada fuente. Las celdas se utilizan a menudo conjuntamente con las cartas de densidad de emisiones para indicar los cambios en la densidad general de las emisiones en las cercanías del aeropuerto. Esto es una gran ayuda para el planificador del aeropuerto a efectos de evaluar la ubicación de las áreas más problemáticas y contribuye a determinar dónde podrían necesitarse medidas de control. La representación basada en celdas también se ajusta estrechamente a los análisis de dispersión donde se aplicarían niveles de concentración modelizados conjuntamente con cartas de uso de los terrenos, mapas de población, tipos de vivienda, zonas sensibles, etc.

4.3.2 Por otra parte, la distribución por zonas de actividad permite que el aeropuerto evalúe las emisiones relacionadas con esas actividades particulares. Estas zonas de actividad podrían ser el área de la puerta, el aeródromo, los estacionamientos, la red de carreteras, las zonas de descarga, etc. Como se mencionó, la exactitud de la atribución a cada zona depende de cuán bien puede caracterizarse la fuente. Las emisiones de cada zona permitirían la caracterización de la zona en cuestión y la comparación de programas alternativos para reducir estas emisiones de la actividad específica. En el caso de la modelización de la dispersión, las zonas podrían relacionarse con la evaluación de métodos para reducir posibles consecuencias sobre la salud y el bienestar públicos a nivel local.

---

2. En el contexto de este manual, los términos “atribución” y “distribución” son intercambiables.



4.3.3 La distribución espacial es un proceso directo para las fuentes estacionarias y puede elaborarse fácilmente. Las emisiones de las fuentes estacionarias se determinan para la hora o tiempo de uso, pero no se mueven. Las fuentes móviles crean dificultades porque pueden atravesar varias fronteras espaciales delineadas a menos que se defina específicamente una zona de actividad para la fuente. Esto es especialmente cierto para el GSE móvil donde puede ser necesario establecer directrices a efectos de asegurar una distribución espacial fiable y coherente. Cuando se aplica el enfoque de las celdas, las emisiones parciales para la operación deben calcularse para cada celda. Esto tiene como resultado la combinación de parámetros de tiempo y espacio. Un enfoque común consiste en determinar el tiempo en una celda particular utilizando el índice de emisión (EI) y atribuir las emisiones para esa celda. Este procedimiento se describió en el Capítulo 3. El mismo debe completarse para todas las fuentes móviles que ingresan al área definida y sumarse con las fuentes estacionarias en dicha área. La suma de todas las fuentes, para cada contaminante específico, da como resultado la densidad de las emisiones para el área definida.

4.3.4 Es importante recordar que la distribución espacial proporciona solamente información sobre densidad de emisiones, la variabilidad de las emisiones exige el uso de la distribución temporal y ambos combinados proporcionan al analista una herramienta aún más poderosa.

#### 4.4 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL

4.4.1 La distribución temporal proporciona una medida de la variabilidad de las emisiones, por duración. Como lo señala la EPA de los Estados Unidos, "(d)ebido a que la modelización de la calidad del aire intenta representar los procesos físicos y químicos reales a medida que ocurren a lo largo de una duración de tiempo específica, es importante que la atribución temporal de las emisiones sea lo más exacta posible. La atribución temporal puede considerarse como un recuento de la variación de las emisiones con el tiempo. La atribución temporal más sencilla es la efectuada a una fuente de emisiones de estado estable que libere continuamente emisiones en la misma proporción todo el tiempo. No obstante, en condiciones reales, las fuentes de emisión de estado estable son relativamente raras. Por el contrario, en condiciones reales, las fuentes de emisiones pueden funcionar solamente en el invierno, no funcionar los domingos, o su actividad puede ser máxima durante ciertas horas del día. Las atribuciones temporales permiten que la variabilidad de las emisiones sea modelizada correctamente durante los períodos de modelización deseados. Estos variarán con arreglo a las finalidades del inventario".

4.4.2 La distribución temporal exige determinar la hora del día de la actividad. Por ejemplo, una planta térmica puede funcionar continuamente y las emisiones serán constantes durante todo el día y pueden atribuirse fácilmente a lo largo de éste. Esto daría como resultado factores de actividad iguales para cada hora y una densidad de emisiones constante para esta fuente estacionaria. No obstante, las fuentes móviles como las aeronaves no tienen una actividad continua y a menudo las actividades no duran una hora entera. Esto hace que la distribución sea más difícil. A esto se agrega el movimiento de la fuente entre áreas definidas según se analizó anteriormente. Para estas fuentes, debe tenerse cuidado de definir las horas de uso por zona o área definida. En el caso extremo, puede ser necesario contar con perfiles de actividad para cada ruta de rodaje principal y considerarse como zona separada. El tiempo en que una fuente permanece en una zona puede relacionarse con la velocidad de la fuente móvil y la distancia recorrida en cada área definida, es decir:

$$\text{tiempo en la zona} = \text{distancia recorrida en la zona} / \text{velocidad de la fuente móvil.}$$

4.4.3 Si la velocidad varía en las zonas, este proceso quizás deba subdividirse más y determinarse el total. A menudo, se supone una velocidad promedio para simplificar el proceso. Además, debe determinarse el trayecto que la fuente móvil recorre mientras permanece en la zona. Cuando se trata de carreteras, calles de rodaje, pistas o rutas determinadas, el proceso está bien definido. Cuando el trayecto no está bien definido, deben hacerse aproximaciones. Por ejemplo, puede suponerse que un automóvil que circula por un estacionamiento recorre la mitad de la distancia posible total a la entrada y luego la mitad de la distancia posible total durante la salida. Una vez que se ha determinado el tiempo de permanencia en el área definida, el proceso de estimación de las emisiones pasa a ser el descrito en el Capítulo 3.

4.4.4 Puede verse que es probable que ocurran otras dificultades con fuentes sin trayecto definido en absoluto. En estos casos, puede ser necesario realizar una observación a efectos de determinar un tiempo representativo. Un procedimiento simplificado también podría aplicarse sobre la base de estudios anteriores para determinados tipos de equipo (por ejemplo, GSE). En el Capítulo 3, Apéndice 2, se presentan datos de este tipo. Para fuentes estacionarias menores, como en el deshielo, instrucción de incendios y ensayos de motores, podrían efectuarse algunas simplificaciones para atribuir las emisiones en forma temporal y espacial (por ejemplo, pueden utilizarse datos meteorológicos para definir cuándo se realizan actividades de deshielo).

## 4.5 EMPLEO DE MODELOS COMPUTARIZADOS

4.5.1 Los modelos computarizados sobre calidad del aire que se han elaborado para los análisis de los aeropuertos permiten a menudo que los datos espaciales y temporales tanto de entrada como de salida constituyan elementos de los inventarios de emisiones. Estos modelos incluyen: AEDT y EDMS (FAA de los Estados Unidos), LASPORT, ADMS y Open-ALAQS (EUROCONTROL).

4.5.2 Durante la elaboración de datos de entrada para estos modelos, será a menudo necesario aplicar el proceso descrito anteriormente dado que los modelos pueden no tener algoritmos para todas las fuentes que puedan permitir la determinación espacial y temporal. Un modelo basado en GIS debería facilitar el proceso de distribución espacial mediante su interfaz altamente visual; en la Figura 4-1 se muestra un ejemplo extraído del ALAQS-AV (versión anterior del Open-ALAQS), basado en Arcview. LASPORT y EDMS también tienen capacidades GIS. Cabe señalar que todo programa gráfico basado en interfaz de usuario apoyará la determinación espacial con más facilidad y, con datos de entrada adecuados, podrá ayudar a la distribución temporal. El usuario debería consultar la guía de usuario del modelo correspondiente para obtener más información.

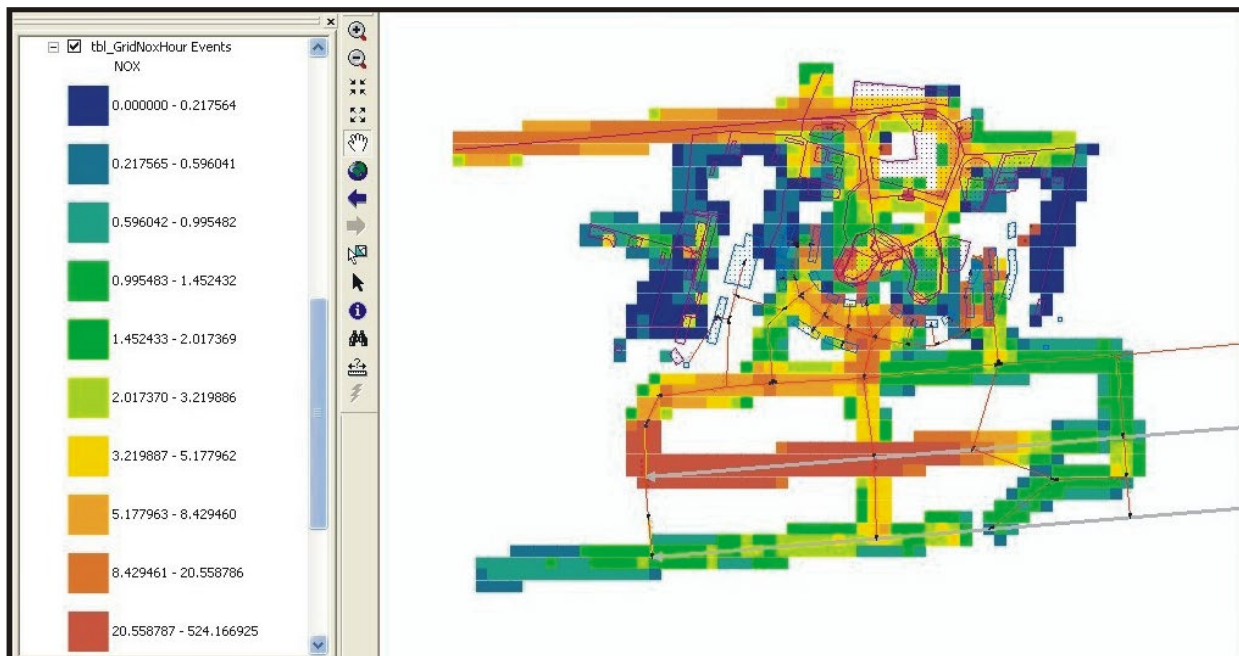


Figura 4-1. Ejemplo de un inventario de emisiones geoespaciales en 2 dimensiones

## 4.6 FORMATO Y NOTIFICACIÓN DE LOS DATOS

4.6.1 A menudo es fundamental aplicar un enfoque de tipo matriz cuando se notifican los resultados espaciales y temporales de las emisiones. En la Figura 4-2 se muestra un ejemplo (EPA Estados Unidos). Puede verse que las fuentes 23 y 24 son fuentes de emisión continua mientras que la fuente 25 representa una fuente con variabilidad temporal de las

emisiones. A partir de este tipo de análisis, pueden determinarse fácilmente las emisiones para cualquier hora. Por ejemplo, la fuente 24 emite 417 libras entre las 14:00 y las 15:00. Ese mismo enfoque de matriz también podría utilizarse para la notificación espacial o para cada fuente en una tabla única, una combinación de datos espaciales y temporales. En algunos modelos, estas matrices pueden obtenerse como producto de salida.

4.6.2 Una vez que los datos se encuentran en este formato, también pueden usarse gráficas para mostrar los resultados e identificar con más facilidad las tendencias. Por ejemplo, la Figura 4-3 es el diagrama trazado de la fuente 25 indicada en la Figura 4-2. Puede verse que la fuente se utiliza por la tarde, pero mucho menos en otras horas del día. Esto podría utilizarse para obtener la distribución espacial y también con gráficas tridimensionales, lo que permitiría una mucho más fácil comprensión por parte del examinador.

4.6.3 Las presentaciones gráficas también pueden utilizarse para mostrar la distribución geoespacial, normalmente en cuadrículas de densidad bidimensionales, pero también podría preverse un uso cuidadoso de las técnicas tridimensionales para fuentes como las aeronaves según se ilustra en la Figura 4-4.

Hora	...	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	...	Total
23	...	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	...	10005
<b>24</b>	...	417	417	417	417	417	417	<b>417</b>	417	417	417	417	417	417	417	...	<b>10008</b>
25	...	508	763	847	847	847	847	847	847	847	847	763	508	254	85	...	9996

Libras por hora liberadas

Fuentes

Figura 4-2. Datos de perfil diario

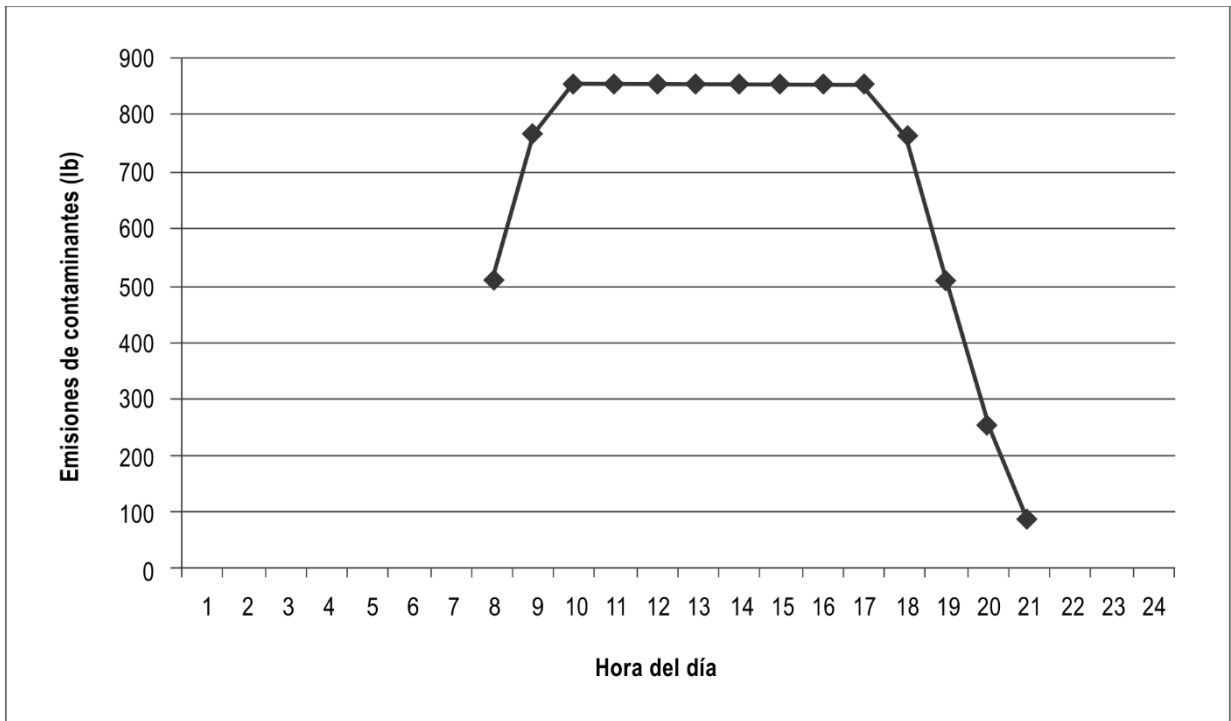
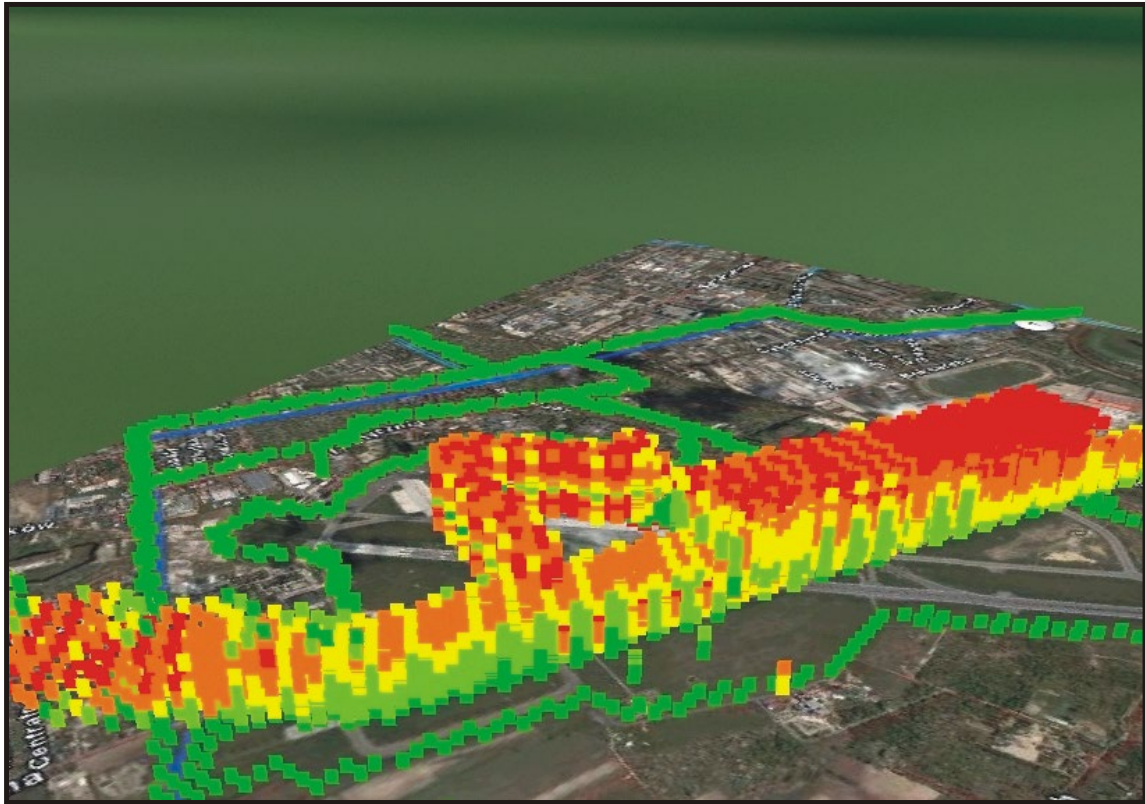


Figura 4-3. Gráfica de perfil diario



**Figura 4-4. Ejemplo de un inventario de emisiones geoespacial tridimensional**

---

# Capítulo 5

## MODELOS DE DISPERSIÓN

### 5.1. INTRODUCCIÓN

5.1.1 En el Capítulo 3, se analizó una orientación para estimar las masas emitidas de diversos contaminantes. No obstante, la masa total emitida no tiene en cuenta la mezcla en la atmósfera, que determina las concentraciones locales, ni tampoco cuánta masa se mezcla en el aire en un tiempo determinado. Se requiere una modelización adicional para estimar estas concentraciones ambientales locales.

5.1.2 Una sustancia traza liberada de una fuente a la atmósfera libre será transportada por el campo medio del viento y dispersada por la turbulencia atmosférica. Este procedimiento se conoce como dispersión atmosférica. La dispersión puede definirse más estrictamente<sup>1</sup> como “diseminación de los valores en una distribución de frecuencias con respecto a un valor medio”. Se deduce entonces que la modelización de la dispersión atmosférica es la simulación matemática del proceso de diseminación o mezcla en la atmósfera ambiental. Las trazas de sustancias que se evalúan con mayor frecuencia son los contaminantes atmosféricos reglamentados que se presentaron en el Capítulo 3, 3.4, para las fuentes aeroportuarias. En un cálculo de dispersión relacionado con el aeropuerto, se modeliza la mezcla atmosférica de estas sustancias o contaminantes traza emitidos de las fuentes locales sobre la base de principios científicos y se predicen las resultantes distribuciones de concentraciones (por lo general cerca de la superficie). Los resultados, o concentraciones atmosféricas previstas, constituyen la base de los estudios de consecuencias sobre la calidad del aire local y se utilizan para demostrar el cumplimiento de los reglamentos o normas requeridos.

5.1.3 En este capítulo se presenta la necesidad de construir modelos de dispersión en las cercanías de los aeropuertos, se proporciona una breve reseña de los modelos de dispersión, se resumen las prácticas normales que se realizan durante la modelización de la dispersión atmosférica en los aeropuertos y se examina la forma en que se utilizan las concentraciones previstas para estimar los impactos. El capítulo se ha concebido en forma semejante al Capítulo 3, es decir, la modelización requerida se analizará en términos de enfoques simple, avanzado y sofisticado.

### 5.2 REQUISITOS E IMPULSORES/MOTIVADORES EXTERNOS

5.2.1 En esta sección se analiza la necesidad de la modelización de la dispersión y los impulsores externos que causan y afectan esta necesidad. Según se describió en detalle en el Capítulo 2, las evaluaciones de la calidad del aire para medidas propuestas en los aeropuertos son a menudo necesarias para abarcar los casos siguientes:

- a) empeoramiento de la calidad del aire que lleva a márgenes reducidos en aplicación de los reglamentos existentes;
- b) aumento del conocimiento sobre las consecuencias para la salud, que conduce a la producción de nuevos reglamentos, incluyendo la adición de nuevas especies contaminantes;
- c) desarrollo de restricciones resultantes de limitaciones impuestas por la necesidad de satisfacer las normas de calidad del aire;

---

1. Diccionario Merriam-Webster en línea, <http://www.merriam-webster.com/dictionary/dispersion> (junio de 2020).

- d) mayores expectativas del público con respecto a los niveles de calidad del aire;
- e) actividades de relaciones públicas desarrolladas por el aeropuerto y por los grupos de presión sobre medio ambiente; y
- f) requisitos legislativos de diversos países y regiones.

5.2.2 La modelización de las emisiones para satisfacer estos requisitos ya se ha analizado. La modelización de las emisiones, un requisito previo para la modelización de la dispersión, permite examinar con carácter temporal y espacial los cambios que se registren en las emisiones. No obstante, los impactos directos se relacionan más con las concentraciones ambientales y no sólo con la masa de emisiones emitidas. Las normas de calidad del aire ambiente, las consecuencias reales y los impactos para la salud se evalúan mejor mediante el uso de concentraciones ambientales que con el uso de masas emitidas. Como se describió anteriormente, la mezcla atmosférica de las emisiones produce concentraciones ambientales que muy a menudo se emplean para determinar impactos locales. Las mediciones, descritas en el Capítulo 6, pueden ser muy costosas, definen solamente la concentración en un punto del espacio para cada medición y no revelan fácilmente la contribución fraccional de cada fuente. La modelización de la dispersión permite evaluar la cantidad del aire local a un costo razonable. Independientemente, la necesidad de la modelización de la dispersión consiste en determinar la mezcla ambiental como parte del proceso de análisis general.

5.2.3 Más allá de la evidente necesidad de la modelización de la dispersión, la legislación o las ordenanzas a menudo establecen que se utilice el proceso de estimación. Los reglamentos resultantes de estos requisitos jurídicos también pueden especificar la forma en que debe realizarse la modelización o la dispersión o la forma en que se consideran las variables. Se aconseja al analista que revise todos los requisitos conexos para asegurar que el proceso se realiza según lo estipulado.

### 5.3 CONCEPTOS GENERALES SOBRE DISPERSIÓN

5.3.1 En esta sección se proporciona una breve reseña de los conceptos físicos básicos correspondientes a la modelización de la dispersión y el proceso requerido. Se incluyen referencias para permitir que las partes interesadas exploren estos conceptos con más profundidad de lo que se presentan aquí. La comprensión de la forma en que funcionan los modelos debería llevar a un uso más apropiado de los mismos.

5.3.2 Cuando una fuente emite un elemento traza o contaminante, el destino final del mismo queda determinado por las características del contaminante, las características de la fuente, el movimiento atmosférico y la topografía local. Cada uno de estos parámetros desempeña una función importante en las concentraciones locales. Un contaminante liberado en su forma final se denomina contaminante primario. Los contaminantes primarios que son de reacción muy lenta con otros gases de la atmósfera se denominan contaminantes primarios pasivos. Los contaminantes primarios como el monóxido de carbono (CO) se denominan a menudo inertes debido al muy largo tiempo de reacción y de residencia en la atmósfera. Los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera cuando el precursor original emitido sufre reacciones químicas u otros procesos de conversión en la atmósfera y forma un nuevo contaminante. El contaminante se denomina secundario dado que la composición final no es igual a la liberada de la fuente. El ozono (O<sub>3</sub>) es un contaminante secundario.

5.3.3 La fuente contaminante afecta las concentraciones locales debido al lugar de la liberación, el régimen de flujo de masa total y la dinámica del aire de los escapes debido a los efectos sobre la dispersión atmosférica, además del movimiento de la atmósfera. Los movimientos atmosféricos determinan la dirección general en la que viajan las emisiones y son los principales responsables de la mezcla con la atmósfera ambiente (dispersión), creándose así un "penacho" de contaminantes. La dirección del penacho se determina por el movimiento en gran escala, como la corriente de viento medio, mientras que la mezcla se relaciona más con las corrientes parásitas de pequeña escala en dicho flujo, conocidas como turbulencias. Análogamente, las características del terreno y las estructuras de los edificios locales tendrán

consecuencias respecto de las concentraciones en el área local debido a los cambios de las pautas del viento y la generación de turbulencia. Todos estos parámetros afectan la dispersión atmosférica y llevan a una distribución de la concentración de la sustancia traza emitida (contaminante) tridimensional y en general dependiente del tiempo. Análogamente, otros procesos específicos de las sustancias pueden tener consecuencias como deposiciones secas o húmedas.

5.3.4 Las cantidades que determinan la dispersión atmosférica que resulta en una concentración local pueden agruparse como sigue:

- a) Q1 parámetros de fuente (lugar, forma, dinámica del aire de escape);
- b) Q2 parámetros de emisiones (fuerza de las emisiones de cada sustancia traza para cada fuente);
- c) Q3 parámetros de sustancias (por ejemplo, propiedades de conversión o deposición);
- d) Q4 parámetros atmosféricos (por ejemplo, velocidad del viento, dirección del viento, propiedades de turbulencia y temperatura); y
- e) Q5 parámetros del terreno (por ejemplo, rugosidad de la superficie, perfil del terreno, obstáculos).

5.3.5 No todos los parámetros mencionados son independientes y la mayoría de ellos dependen del tiempo. Es evidente que el conjunto de parámetros comprende información adicional que va más allá de la requerida para el cálculo de las emisiones, aun cuando la atribución de las emisiones se haya realizado según se describe en el Capítulo 4.

5.3.6 En los aeropuertos, las fuentes pertinentes pueden agruparse como sigue:

- a) S1 aeronaves, incluyendo grupos electrógenos auxiliares (APU);
- b) S2 fuentes de servicio de escala de aeronaves (por ejemplo, GSE, abastecimiento de combustible a aeronaves, vehículos de la parte aeronáutica);
- c) S3 fuentes estacionarias y de área (por ejemplo, plantas electrógenas, instrucción para incendios); y
- d) S4 tránsito de acceso al aeropuerto (por ejemplo, vehículos motorizados de la parte pública).

5.3.7 Las metodologías sobre dispersión utilizadas se aplican obviamente sólo a las fuentes directamente incluidas en el modelo. Las contribuciones regionales o de fondo también se añaden a la concentración local total para producir la concentración total. La concentración total se necesita para compararla con los criterios aplicables o normas correspondientes. Estas fuentes de fondo pueden ser importantes y estar emplazadas a diversas distancias del aeropuerto. Deben considerarse la forma en que las fuentes de fondo y las concentraciones resultantes se tienen en cuenta sobre la base de la resolución espacial del área de modelización y de las fuentes de datos que han de utilizarse, como las estaciones de monitoreo ambiental a largo plazo. Esto plantea un contraste con las evaluaciones acústicas, donde normalmente la contribución del aeropuerto es, de hecho, el componente más dominante. Para tener en cuenta la concentración general debe agregarse la concentración de fondo a la concentración prevista por los modelos. Esto da como resultado lo siguiente:

$$c_t = c_s + c_b$$

Ec. 5-1

donde:

- c = concentración con subíndices t, s y b que representan total, de la fuente y de fondo, respectivamente.



5.3.8 La suma de la ecuación 5-1 representa la concentración en un punto del espacio de todas las fuentes y es el valor que se compara con las normas sobre calidad del aire ambiente aplicables. Cabe señalar que la concentración,  $c$ , es específica de cada contaminante, es decir, no pueden sumarse contaminantes de especies diferentes.

5.3.9 Entre los conceptos y elementos fundamentales de la modelización de la dispersión, se incluyen:

- a) identificación del modelo y opciones;
- b) características de la liberación de las emisiones de la fuente;
- c) datos meteorológicos;
- d) asignación espacial;
- e) perfiles temporales,
- f) datos topográficos;
- g) deflexión descendente de las corrientes de aire en torno de los edificios;
- h) ubicaciones de los receptores;
- i) conversión de  $\text{NO}_x$  a  $\text{NO}_2$ ; y
- j) concentraciones de fondo.

5.3.10 Varios enfoques de la modelización de la dispersión se han aplicado en diversos aeropuertos del mundo para predecir las concentraciones locales. A medida que la ciencia continúe evolucionando, también lo harán los modelos de aeropuerto. En este contexto, el presente capítulo se concentrará en las metodologías comunes utilizadas actualmente y no en los modelos específicos.

5.3.11 La formulación real de estos modelos puede variar. Para ayudar al lector a comprender mejor las metodologías de los modelos de dispersión, en el Apéndice 1 se analizan brevemente las fórmulas de los modelos. En el Apéndice 2 se indican los modelos computarizados de uso común para la modelización de la dispersión en los aeropuertos.

## 5.4 DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS PARA EL MODELO

5.4.1 En esta sección se proporciona información sobre las variables necesarias para realizar un análisis de dispersión. Si bien esta es una reseña general dirigida a facilitar la comprensión del lector, las variables necesarias variarán según el método de modelización (simple, avanzado, sofisticado) y el modelo específico utilizado. Además, cada aeropuerto es singular y esta gran variabilidad, las diferencias en la disponibilidad de datos y el producto final deseado, también dan como resultado conjuntos de datos diferentes para cada aeropuerto.

### Información sobre fuentes de emisión

5.4.2 En esta sección se incluye una breve reseña de la información que será necesaria para completar el análisis de concentraciones.

**Fuentes de emisiones aeroportuarias**

5.4.3 Las fuentes de contaminantes del aire en los aeropuertos son muchas y variadas. Para realizar un modelo de concentraciones, para cada fuente estudiada, debe contarse con valores de la fuerza de emisión de cada una de las sustancias modelizadas. En el Capítulo 3 figura una descripción detallada de las fuentes de emisión encontradas en los aeropuertos.

**Consideraciones temporales y espaciales sobre el aeropuerto (por ejemplo, calles de rodaje, pistas, puertas)**

5.4.4 Al realizar un inventario de emisiones, no siempre se requieren o completan atribuciones espaciales y temporales. No obstante, las atribuciones espaciales y temporales son de principal importancia durante la modelización de la dispersión dado que se calcularán las concentraciones locales. Estas concentraciones locales dependen de la distancia a la fuente y su tiempo de funcionamiento. Esto requiere no sólo los datos de emisión, sino también detalles explícitos sobre cuándo, dónde y en qué manera ocurren las emisiones. La variación espacial y temporal del aeropuerto se analizó en el Capítulo 4 en relación con la distribución de las emisiones.

5.4.5 La modelización de la dispersión se basa frecuentemente en coordenadas Cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) donde  $x$  e  $y$  son las distancias horizontales y  $z$  es la distancia vertical a partir de un punto de referencia establecido. Una práctica común, para la fácil transferencia de mapas, es establecer el eje  $y$  positivo en el sentido norte. Para una modelización de la dispersión detallada (véase el Capítulo 4) se requiere una comprensión profunda del funcionamiento del aeropuerto. Para todos los enfoques excepto para el simple, deben establecerse todas las ubicaciones de las fuentes (véase el Capítulo 4) y para la modelización de la dispersión debe agregarse un nuevo componente, el receptor, según se señala en 5.4.16. El lugar del receptor debe especificarse con exactitud, al igual que la fuente, lo que conduce al empleo de coordenadas como las del sistema de coordenadas Cartesianas. La ubicación definida del receptor determina dónde se hará la predicción de la concentración aplicando los modelos de dispersión. Esto se hace muy a menudo en lugares de frecuente uso humano. Algunos modelos de dispersión se basan en períodos de tiempo específicos dado que sus parámetros de dispersión cambian con el tiempo después de la liberación. Esto a menudo constituye un parámetro interno, transparente al usuario, y puede adaptarse sobre la base de las necesidades de salida, para comparar con las normas sobre calidad del aire ambiente.

**Factores de emisión**

5.4.6 Se necesitan factores de emisión para determinar el régimen de liberación de emisiones de cada fuente. Los factores de emisión son específicos de la fuente y del contaminante. El lector puede referirse al Capítulo 3 donde figura un análisis completo de los factores de emisión.

**Meteorología**

5.4.7 Los datos meteorológicos son una entrada fundamental para el cálculo de la dispersión. Sin datos sobre las condiciones meteorológicas locales no es posible construir modelos de dispersión excepto en casos simples. Para todos los modelos con un cierto nivel de perfeccionamiento, los parámetros de la capa límite planetaria (PBL) deben conocerse. Al igual que otras variables, el grado de perfeccionamiento del proceso de modelización puede variar, pero aquí se analiza un conjunto general de necesidades. Además, en el Apéndice 3 de este capítulo figuran algunas fuentes comunes para estos datos.

### **Datos del viento**

5.4.8 La velocidad y dirección horizontales del viento generadas por el componente geostrófico del viento y alterado por las características de la superficie local y otros parámetros como el terreno son de importancia principal en todos los casos excepto el simple. En los enfoques avanzado y sofisticado, debe establecerse con más detalle climatología local que puede comprender datos de viento de múltiples elevaciones o gradientes del viento vertical. A menudo, estos datos históricos están disponibles en los registros existentes (véase el Apéndice 3). La velocidad y dirección del viento variarán debido a las características de la superficie y la topografía, edificios locales, cobertura de la superficie e influencias de elementos cercanos como grandes masas de agua. Estos factores podrían tenerse en cuenta para establecer un campo de vientos adecuado dependiendo de los requisitos del modelo.

### **Turbulencia y estabilidad atmosférica**

5.4.9 La estabilidad atmosférica puede definirse sencillamente como la condición de turbulencia de la atmósfera y tiene consecuencias importantes en el régimen de dilución de los contaminantes. La turbulencia se refiere a pequeños movimientos de la atmósfera, en general de carácter circular, conocidos como remolinos. Estos remolinos varían considerablemente en tamaño dependiendo de la estabilidad atmosférica. Pequeños remolinos pueden “rasgar” el penacho y causar mezclas con el aire local mientras que los grandes remolinos tienden a mover todo el penacho.

5.4.10 La turbulencia puede caracterizarse de varias maneras, incluyendo métodos empíricos (por ejemplo, las clases de estabilidad de Pasquill-Gifford), el número de flujo de Richardson, el número de gradiente de Richardson o la longitud de Monin-Obukhov. Si bien cada una requiere diferentes datos de entrada para determinarse, la información meteorológica básica necesaria es la velocidad del viento con la altura (cizalladura del viento), la temperatura por altura (régimen de lapso), las fluctuaciones de la velocidad del viento y las características de la superficie. La turbulencia se desglosa a menudo en las categorías de estable (se impide la mezcla vertical de contaminante), neutra (ni se impide ni se fomenta el movimiento vertical de la atmósfera), e inestable (se fomenta el movimiento vertical de la atmósfera).

### **Datos en altitud**

5.4.11 En el análisis avanzado y complejo se reconoce que las condiciones atmosféricas cambian con la altura. Para tener en cuenta este cambio, a menudo se utilizan datos meteorológicos a mayores alturas (hasta algunos cientos de metros), en vez de datos de superficie, aunque algunos modelos pueden aproximar el cambio con la altura basándose en datos de la superficie y el uso de parámetros de capas límite. Si se utilizan datos medidos, estos proceden de sondeos acústicos, suelta de globos con instrumentos e informes de aeronaves.

### **Temperatura**

5.4.12 La temperatura ambiente tiene consecuencias sobre la velocidad de las reacciones químicas y puede necesitarse en el enfoque sofisticado. Algunos modelos pueden necesitar el cambio de temperatura con la altura (velocidad de lapso) para ayudar a la determinación de la estabilidad atmosférica y podría ser necesario tanto para el enfoque avanzado como para el sofisticado.

### **Nubosidad**

5.4.13 La cantidad de nubes tiene la consecuencia directa de modificar el albedo y a menudo se utiliza indirectamente para determinar la estabilidad atmosférica en el enfoque avanzado.

### Parámetros derivados (específicos del modelo)

5.4.14 Muchos parámetros pueden ser importantes dependiendo del modelo elegido (por ejemplo, flujo térmico sensible, velocidad de rozamiento en la superficie, escala de velocidades convectivas, gradiente vertical potencial de temperatura, longitud de Monin-Obukhov, y la relación de Bowen). A menudo, estos parámetros pueden obtenerse de los datos meteorológicos básicos indicados anteriormente. Estos parámetros no se describen aquí, pero si no se calculan directamente por el modelo de dispersión seleccionado, el usuario debería tomar gran cuidado en la comprensión de estos parámetros y la forma en que pueden derivarse.

### Rugosidad de la superficie

5.4.15 Los diferentes tipos de superficie cambian las características de rozamiento de la superficie y afectan el perfil vertical del viento y las características de turbulencia. En los aeropuertos, a menudo existe un relieve de vegetación plano cerca de las pistas, pero la ubicación y altura de edificios como los terminales, las líneas de forestación y, en algunos aeropuertos, cambios importantes en el perfil de la superficie, deben determinarse en su totalidad. Después de esta determinación, pueden emplearse cartas para determinar el valor del parámetro de rugosidad de la superficie ( $z_0$ ) que ha de incluirse en el modelo. En la Tabla 5-1 se muestra un ejemplo de valores que pueden seleccionarse. Cabe señalar que este es un parámetro y no la longitud verdadera de los objetos sobre la superficie.

**Tabla 5-1. Longitud de la rugosidad de la superficie,  $z_0$ , para superficies típicas<sup>2</sup>**

Descripción del terreno	$z_0$ (m)
Agua	0,0001
Prados (invierno)	0,001
Prados (verano)	0,1
Terrenos cultivados (invierno)	0,01
Terrenos cultivados (verano)	0,2
Pantanos	0,2
Matorrales desérticos	0,3
Bosques caducos (invierno)	0,5
Bosques caducos (verano)	1,3
Bosques de coníferas	1,3
Urbano	1,0–3,0

### Receptores

5.4.16 Un receptor es un lugar en el espacio que puede representar ocupación humana o sencillamente un lugar de interés. Los receptores también pueden ser sencillamente una cuadrícula predeterminada de un tamaño específico, en un punto de referencia de aeropuerto establecido. Los lugares de receptores pueden definirse tanto dentro como fuera del aeropuerto. Estos se escogen por medio de un examen del aeropuerto con particular interés en lugares en que ocurren actividades humanas normales o en otros lugares, como, por ejemplo, reservas naturales. La elección de los lugares de receptores resultará en concentraciones modelizadas en esos puntos y utilizada para determinar el impacto general en esa ubicación.

2. D.B. Turner, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, An Introduction to Dispersion Modelling*, 2<sup>nd</sup> Ed., Lewis Publishers, Boca Raton, FL., 1994.

### Concentraciones de fondo

5.4.17 Como se analizó anteriormente (Ec. 5-1), las concentraciones de fondo se deben a fuentes que no se consideran durante el proceso de modelización. Estas concentraciones deben sumarse, sobre la base de cada contaminante, a los resultados del modelo para obtener la concentración total de cualquier contaminante. Las concentraciones de fondo se generan por las carreteras cercanas, la industria, las operaciones comerciales, las áreas residenciales y el transporte de largas distancias. Estas concentraciones son muy a menudo determinadas por estaciones de medición a largo plazo en el área dado que las fuentes son demasiado numerosas como para modelizarse durante una evaluación del aeropuerto. A menudo se utiliza la concentración media contra el viento en el aeropuerto que puede atribuirse temporariamente a cambios diurnos en las otras fuentes locales. Dependiendo del contaminante, un considerable porcentaje de las concentraciones generales (medidas) puede proceder de concentraciones de fondo a veces transportadas al área bajo estudio desde largas distancias.

### Química atmosférica

5.4.18 Como se mencionó anteriormente, los contaminantes pueden reaccionar con otros componentes en la atmósfera después de ser emitidos por la fuente. Esto causa cambios en los recursos y crea nuevos contaminantes. Esto tiene particular importancia para las emisiones de las aeronaves en las que se crean gases secundarios y contaminantes de materia particulada. Este tema tiene carácter avanzado y a menudo estará incorporado en el modelo utilizado o incluso se ignorará dependiendo del alcance del estudio. Las relaciones químicas son siempre ignoradas en el enfoque simple definido aquí. En el caso en que la química atmosférica no se considere explícitamente, pueden aplicarse relaciones basadas en datos históricos y esto se define en el presente documento como el enfoque avanzado. Por ejemplo, la relación de NO a NO<sub>2</sub> es importante. Los datos históricos pueden proporcionar una relación típica. Esta relación puede aplicarse entonces a la predicción de NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) por parte de modelos sin algoritmos químicos. Si el modelo no la realiza, la caracterización por especies de los hidrocarburos también puede ser aproximada basada en esta forma en la predicción de los hidrocarburos totales y en datos históricos.

5.4.19 Las reacciones químicas ocurren a velocidades diferentes y son afectadas por las concentraciones ambientales, el tiempo de transporte y las condiciones del medio ambiente, factores todos considerados en el enfoque sofisticado. El tiempo de reacción es diferente para cada contaminante y la velocidad de reacción es necesaria para construir modelos de dispersión de contaminantes reactivos.

## 5.5 CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN

5.5.1 En el Apéndice 1 de este capítulo figura una reseña muy general de las metodologías de dispersión mientras que en el Apéndice 2 se indican los modelos comúnmente utilizados para análisis aeroportuario. No es la finalidad de este capítulo proporcionar instrucciones detalladas para el uso de tales metodologías o conceptos, y se recomienda que el lector se dirija a los textos apropiados o manuales de usuarios para cada metodología o método escogido. En esta sección se describen los fundamentos de los enfoques simple, avanzado y sofisticado. La elección del método que mejor se adecue al análisis dependerá de los datos disponibles y del uso deseado de los resultados.

### Análisis y nivel de esfuerzo

5.5.2 A medida que el analista avanza del enfoque simple al avanzado y luego al sofisticado, los requisitos de datos aumentan, así como el tiempo del análisis. No obstante, la exactitud aumenta con el esfuerzo adicional necesario si los datos de entrada son de buena calidad. El enfoque simple debería tener carácter conservador mientras que los enfoques avanzado y sofisticado proporcionarán resultados que permiten que el análisis de las consecuencias sea más realista. En la Tabla 5-2 se muestran las variables de entrada que pueden ser necesarias si se escoge el enfoque simple, o el avanzado o el sofisticado. Las necesidades exactas están determinadas por el propio modelo seleccionado.

*Nota.* — La designación 1 en el enfoque simple se refiere al enfoque proporcional (rollback) mientras que la designación 2 significa un análisis conservador a menudo conocido como “análisis del peor caso”.

**Tabla 5-2. Datos de entrada necesarios según el enfoque adoptado**

Parámetros clave	Enfoque simple	Enfoque avanzado	Enfoque sofisticado
Emisiones	Según se describe en el Capítulo 3.		
Resolución espacial	Para el caso 1 (modelo proporcional o “rollback”): no hay diferenciación especial; el aeropuerto se considera una “burbuja de emisiones”. Para el caso 2 (“el peor caso”): tamaño de malla muy grande utilizando la fuente de un único lugar, como las pistas.	Posiciones de receptor definidas con resolución espacial en una retícula gruesa (por ejemplo, tamaño de malla no inferior a 500 m).	Posiciones del receptor definidas con retícula fina en malla de 10 x 10 m, pero no más de 500 x 500 m.
Resolución temporal	Total anual.	Resolución mensual o diaria.	Resolución horaria o menor.
Meteorología	No se utilizan datos meteorológicos o se usan valores por defecto: <ul style="list-style-type: none"> <li>• velocidad del viento: 1 m/s;</li> <li>• dirección constante del viento;</li> <li>• atmósfera estable para fuentes de superficie;</li> <li>• no se usa elevación de penacho para predecir una estimación conservadora (a la que se suele denominar “el peor caso”);</li> <li>• concentración calculada en el receptor;</li> <li>• no se considera la altura de mezcla.</li> </ul>	Se consideran: <ul style="list-style-type: none"> <li>• datos climatológicos para múltiples parámetros que van desde un promedio horario a diario;</li> <li>• turbulencia como único parámetro (p.ej., la clasificación de estabilidad basada en la velocidad de viento y la nubosidad);</li> <li>• altura de mezcla media para el área de 914 metros (3 000 ft) que se considera en la hipótesis.</li> </ul>	Se consideran: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos climatológicos detallados en pequeña escala temporal incluyendo datos en altitud y datos de altura de mezcla específicos;</li> <li>• múltiples parámetros derivados que requieren de datos adicionales (p.ej., nubosidad y gradientes de temperatura).</li> </ul>
Rugosidad de la superficie	Se considera que toda el área es plana y cubierta de hierba.	Consideración de características topográficas principales.	Consideración de características topográficas, cobertura de la superficie y edificios locales.
Información sobre receptores	Emplazamientos generales a nivel de superficie.	Emplazamientos específicos a nivel de superficie.	Emplazamientos específicos con diversas ubicaciones horizontales y verticales.
Concentración de fondo	No se considera o se toma un valor único para el área aeroportuaria.	Valor único para el área aeroportuaria.	Incluye consideraciones temporales y espaciales.
Química atmosférica	Ninguna.	Relaciones de transformación típicas (analíticas) de estudios establecidos.	Constantes de velocidad de reacción detalladas con consideración de concentraciones ambientales locales de especies químicas reactivas.

5.5.3 Una vez más cabe señalar que muchos modelos no apoyarán todas las variables o exigirán información muy específica, y es responsabilidad del analista determinar las variables que requiere cada modelo.

### Enfoque simple

5.5.4 El enfoque simple puede considerarse de dos maneras bien diferenciadas:

- a) uso de un modelo proporcional (rollback) en el que no hay datos sobre el aeropuerto, excepto para cambios generales en las operaciones; y
- b) un análisis simplista denominado “del peor caso”.

Al igual que en el Capítulo 3 para las emisiones, el enfoque simple se recomienda solamente cuando se dispone de datos limitados o para evaluaciones iniciales.

### Enfoque proporcional (rollback)

5.5.5 El enfoque proporcional es el más simple y el que exige menos datos y, por ello, puede aplicarse muy rápidamente. También representa el mayor margen de error. En este enfoque, que no es realmente una modelización de la dispersión, se ordenan las emisiones y concentraciones conocidas según los cambios generales en las operaciones del aeropuerto. Esto supone que todas las otras fuentes se incrementan o disminuyen al mismo ritmo que las operaciones de las aeronaves. En la ecuación 5-2 se representa numéricamente esta idea:

$$\Delta_2 = \Delta_1(O_2/O_1) \quad \text{Ec. 5-2}$$

donde:

$\Delta_2$  = emisiones totales o concentraciones de área locales en el momento 2;

$\Delta_1$  = emisiones totales o concentraciones de área locales en el momento 1;

$O_{1,2}$  = operaciones de aeronave en LTO para los momentos 1 y 2, respectivamente.

### Análisis “de peor caso”

5.5.6 En este análisis, se supone que la velocidad del viento sea el menor valor que proporcione respuestas razonables en un modelo, normalmente una constante de 1 m/s. También se supone que el viento proceda de una dirección que produce la mayor concentración en el lugar del receptor. La estabilidad atmosférica se considera muy estable para las fuentes de nivel de superficie y no se considera la altura de mezcla. Se supone que las concentraciones de fondo tengan un único valor conservador. El uso de estos parámetros da por resultado un análisis denominado “de peor caso” en el que en realidad las concentraciones raramente alcanzarían un valor tan alto. Estas hipótesis conducen a la lógica de que si no se muestra que los criterios o normas se excedan en esta estimación conservadora donde es muy probable que las concentraciones previstas se den a un nivel mayor que el normal, entonces no hay consecuencias importantes. Pueden utilizarse modelos simples y, por eso, este método puede codificarse en una hoja de cálculo (como el uso de la fórmula gaussiana del Apéndice 1) o pueden usarse gráficas y tablas. También pueden aplicarse modelos computarizados simples. La ventaja es que sólo se requiere un pequeño conjunto de datos y se obtienen resultados rápidos. La desventaja es que produce una predicción muy conservadora que sobreestima las consecuencias.

### Enfoque avanzado

5.5.7 En este enfoque, es fundamental emplear modelos codificados por computadora. El órgano de examen puede requerir modelos específicos. Algunos modelos están disponibles públicamente o pueden comprarse modelos patentados. Cada modelo tendrá una guía de usuario y la mayoría contará con un manual técnico para el analista interesado. Este debe examinar completamente el manual de usuario y estar seguro de las entradas necesarias. El viejo adagio “basura entra basura sale” es muy cierto en este caso y el resultado, aún para el modelo más completo, es solo tan bueno como los datos de entrada que se utilicen. Algunos modelos pueden incluir una interfaz gráfica del usuario (GUI) interactiva para permitir que los datos de entrada sean incluidos con mayor facilidad. De no ser así, deberán crearse ficheros de entrada. Algunos modelos pueden tener los necesarios factores de emisión (o, en el caso de las aeronaves, índices de emisión) incluidos también para facilitar las entradas. En estos casos, el inventario de emisiones también puede realizarse directamente en el modelo. Si esta información no se incluye, el inventario de emisiones deberá completarse, en primer lugar, externamente. Las atribuciones temporales y espaciales pueden ocurrir en la fase del inventario de emisiones o postergarse hasta el análisis de dispersión.

5.5.8 Estos modelos pueden ser los mismos que en el enfoque sofisticado, con la única diferencia de utilizar en mayor medida valores por defecto de las variables de entrada, datos operacionales menos completos, concentraciones de fondo invariables, y un menor grado de definición espacial y temporal. Las entradas para el modelo contienen un gran número de valores “por defecto”, es decir, valores típicos para los aeropuertos, pero no valores reales para el aeropuerto definido. Los modelos típicos aplicados en el enfoque avanzado para la modelización en las inmediaciones de los aeropuertos comprenden Open ALAQS, AEDT/EDMS,<sup>3</sup> ADMS-Airport<sup>4</sup> y LASPORT.<sup>5</sup>

### Enfoque sofisticado

5.5.9 Este enfoque exige la más amplia recolección de datos para definir los datos de entrada. Los valores por defecto se sustituyen con datos reales y esto es especialmente cierto para los datos meteorológicos. Los datos operacionales son muy completos con mucho mayor énfasis en la resolución espacial y temporal. Los modelos pueden ser los mismos que para el enfoque avanzado pero con datos reales y un mucho mayor uso de las opciones. Los modelos típicos utilizados en el enfoque sofisticado para modelización en las inmediaciones de los aeropuertos comprenden Open ALAQS, AEDT/EDMS, ADMS-Airport y LASPORT.

### Enfoque híbrido

5.5.10 Al igual que con las emisiones, los tres enfoques básicos pueden mezclarse con arreglo a las necesidades y los datos disponibles. El enfoque simple, debido a las grandes simplificaciones efectuadas, no se presta a este enfoque híbrido excepto en situaciones muy especiales. Los enfoques avanzado y sofisticado se mezclan con frecuencia. Esto es especialmente cierto cuando se utiliza el mismo modelo primero con un gran número de valores de entrada por defecto para una evaluación de alto nivel y después se refina para permitir una modelización más detallada.

---

3. Modelo de dispersión AERMOD, AERMIC, de la EPA de los Estados Unidos, <http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/mod-desc.txt> (Junio de 2020).

4. CERC, ADMS, <http://www.cerc.co.uk/environmental-software.html> (Junio de 2020).

5. Janicke Consulting, “LASPORT: A program system for the calculation of airport-induced pollutant emissions and concentrations in the atmosphere”, <http://www.janicke.de/en/lasport.html> (Junio de 2020).



## 5.6 PRODUCTOS DE LOS MODELOS

5.6.1 Cada modelo genera diferentes productos, pero algunos son comunes a todos los modelos. El primero es un archivo ecológico que contiene los datos de entrada cuando se utilizan modelos computarizados. Este es un componente importante del producto resultante porque permite al usuario verificar los datos de entrada para:

- a) cerciorarse de que se hayan ingresado con exactitud;
- b) asegurarse de que el modelo ha interpretado los datos de entrada correctamente (muy importante para entradas de campo fijo);
- c) evaluar los parámetros calculados por el modelo que se notificarán con la entrada; y
- d) almacenar los resultados para posteriormente comprender las entradas utilizadas.

5.6.2 El producto más importante de todos los modelos son las concentraciones calculadas. Las concentraciones se expresarán como cierto promedio temporal (por ejemplo, media anual o serie de medias diarias), posiblemente respaldadas por algunos valores estadísticos (por ejemplo, percentiles o frecuencias de valores en exceso) o incluso por una serie temporal completa (por ejemplo, medias horarias en determinados puntos del receptor). Las unidades de las concentraciones se expresarán normalmente en partes por millón (ppm) o microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En el caso de la materia particulada, solo es válida en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las concentraciones calculadas o previstas, incluyendo las de fondo, se deberían comparar con las normas o criterios de calidad del aire ambiente utilizando el marco temporal adecuado y las unidades correctas.

5.6.3 Algunos modelos pueden incluir también salidas gráficas para ayudar a determinar áreas problemáticas o permitir la visualización de los cambios, por ejemplo, durante la modelización de la mitigación. En el enfoque sofisticado, también estarán disponibles a la salida múltiples parámetros derivados.

## 5.7 APLICACIÓN DE LOS MODELOS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.7.1 El analista debería estar consciente de la fidelidad de los resultados. Esto depende del modelo utilizado, la exactitud de los datos de entrada y las posibles hipótesis aplicadas.

### Incertidumbre en los modelos de dispersión

5.7.2 Dado que los modelos de dispersión de la contaminación del aire varían a partir de los más simples a los muy complejos, existe una gran diferencia en la incertidumbre entre modelos. Hanna<sup>6</sup> señala que la incertidumbre de predicción total del modelo es una combinación de parámetros que incluyen errores de la física de modelo, incertidumbre natural o estocástica y errores en los datos. A medida que aumenta el número de parámetros, la incertidumbre natural o estocástica disminuye y la representación por el modelo de la realidad física se hace cada vez mejor. Esto lleva a modelos más complejos y a una gran necesidad de alta fidelidad en los datos de entrada. No obstante, a medida que aumenta el número de parámetros de entrada, los errores de los datos de entrada pueden aumentar. Los datos de entrada de baja calidad pueden hacer que los productos del modelo más complejo sean iguales o incluso inferiores a los de los modelos más simples. Además, los ajustes del modelo basados en conjuntos de datos limitados pueden conducir a errores adicionales.

---

6. S.R. Hanna, "Plume dispersion and concentration fluctuation in the atmosphere," *Encyclopedia of Environmental Control Technology*, Volume 2, *Air Pollution Control*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1989.

5.7.3 Esto hace que la cuantificación de la incertidumbre sea extremadamente difícil. Los modelos pueden funcionar bien en la predicción de los sucesos máximos pero tener un bajo desempeño al tratar de predecir concentraciones en el tiempo y el espacio comparadas con las mediciones.

5.7.4 Los valores límite y los resultados requeridos del modelo a menudo se refieren a cantidades estadísticas como percentiles, promedios a largo plazo como las medias anuales o concentraciones máximas independientes de su ocurrencia específica en el tiempo o su emplazamiento preciso. Un modelo puede producir resultados fiables con respecto a estas cantidades aún si exhibe una débil actuación en las comparaciones punto a punto, por ejemplo, con una serie temporal medida en un emplazamiento determinado.

#### **Verificaciones basadas en las mediciones**

5.7.5 Los modelos de dispersión complejos se aplican en forma de programa de computadora. Con fines de garantía de calidad se exige verificar y validar tales programas para establecer si el programa aplica correctamente las fórmulas matemáticas (algoritmos) del modelo. Luego la validación verifica cuán bien el modelo y el programa respectivamente describen la realidad, normalmente mediante comparación con conjuntos de datos medidos.

5.7.6 Para la validación, es importante que estos conjuntos de datos sean suficientemente completos; es decir, que el ensayo de validación pueda realizarse con la cantidad más pequeña de hipótesis adicionales. Si se requieren hipótesis o si las hipótesis se han implantado en el modelo o en el programa, es importante saber si están basadas en consideraciones generales o ajustadas, por ejemplo, a un aeropuerto o situación específica. Con respecto a los datos de entrada, los modelos complejos están normalmente en mejores condiciones para tener en cuenta los detalles específicos del aeropuerto y, por ello, son más flexibles para la validación frente a los datos medidos.

#### **Comparación con normas y criterios aplicables**

5.7.7 En todo este capítulo se ha utilizado el término impacto o consecuencias. Esto se debe a que los impactos se evalúan con mayor frecuencia comparando las concentraciones previstas de los modelos de dispersión con las normas o criterios que con mayor frecuencia son concentraciones promediadas en el tiempo basadas en las consecuencias para la salud. El uso de estas normas se ha tratado en capítulos anteriores y no se repetirá aquí. No obstante, es importante reconocer la conexión entre los modelos de dispersión y la evaluación de los impactos. Los resultados del inventario de emisiones no permiten este análisis directo de los impactos. También debe considerarse que, usualmente, solo la modelización de la dispersión de todas las fuentes contribuyentes más la inclusión de todas las concentraciones de fondo permitirán obtener resultados que pueden compararse directamente con las normas aplicables. Las incertidumbres de la modernización todavía deberán considerarse con respecto a la notificación de impactos directos.

#### **Aplicación de múltiples ejecuciones durante consideraciones de mitigación**

5.7.8 Tanto el inventario de emisiones como los resultados de análisis de dispersión pueden utilizarse para fines de mitigación. La gran diferencia, según se señaló en la sección precedente, es que los resultados de análisis de dispersión que comparan el caso existente con múltiples escenarios futuros permiten evaluar cambios en la concentración del área local y, por lo tanto, cambios en los impactos relacionados con la salud.

#### **Futuros avances en los modelos**

5.7.9 A medida que aumenta la comprensión de las emisiones y la dispersión de los sistemas de fuentes relacionados con el aeropuerto, irán mejorando los modelos para reflejar e incorporar estos avances.

5.7.10 Además del desarrollo de modelos, está ocurriendo una combinación de modelización en microescala (las analizadas aquí) y regionales para permitir la evaluación de los impactos a gran distancia del aeropuerto y con una más detallada consideración de las concentraciones de fondo en éste.

5.7.11 A medida que se registran progresos, las agencias y las autoridades aeroportuarias se enfrentarán con la necesidad de evaluar y aplicar prácticas de modelización que proporcionen los mejores análisis de impactos para el aeropuerto. En este contexto, el campo es muy dinámico y todos los documentos como el presente deberán evaluarse con el tiempo para efectuar posibles actualizaciones.

-----

## Apéndice 1 del Capítulo 5

### RESEÑA DE LAS METODOLOGÍAS DE MODELIZACIÓN DE LA DISPERSIÓN

1. La modelización de la dispersión es una ciencia relativamente nueva y en desarrollo continuo. En 1895, Reynolds<sup>1</sup> presenta una monografía analizando el flujo laminar y turbulento en cañerías, que algunos consideran fue el punto de partida de la modelización de la dispersión. Taylor<sup>2</sup> produjo una de las primeras monografías sobre turbulencia en la atmósfera en 1915 y, en 1921, produjo la “Teoría de la difusión turbulenta de Taylor” que constituyó la base para describir la dispersión con una difusividad de remolino constante. El desarrollo continuó y, en 1962, Pasquill<sup>3</sup> publicó su importante libro sobre la difusión atmosférica. Este trabajo resumía lo que se había estado haciendo en esa época, y sentó las bases de los modernos modelos de penacho gaussianos basados en la dispersión horizontal y vertical del penacho, determinada experimentalmente como función de la estabilidad atmosférica y de la distancia, los ahora bien conocidos valores sigma. Estos valores sigma se corresponden razonablemente con la teoría de Taylor.

2. Existen diferentes tipos de metodologías de modernización de la dispersión para calcular la dispersión, con diferentes características y capacidades. En el decenio de 1960 se continuó ampliando la labor sobre modelización de la dispersión y se formalizó el proceso de modelización de la dispersión incluyendo consideraciones en materia de elevación de penacho. Esto resulta en la constitución de las bases de los modelos lagrangiano (eje de coordenadas móvil) y euleriano (eje fijo) conocidos actualmente. Estos conceptos han pasado a ser un enfoque aceptado de la predicción de las concentraciones de contaminantes en las inmediaciones de los aeropuertos que está directamente conectado con el impacto sobre la salud y el bienestar público. La aplicación de la modelización de la dispersión requiere una cuidadosa reunión de variables fundamentales y para ello han surgido varias metodologías. A continuación, se presenta una muy breve descripción de cada una de ellas.

#### Fórmula gaussiana

3. La fórmula gaussiana continúa utilizándose más que cualquier otro enfoque. Este enfoque Lagrangiano supone que la dispersión viento abajo es función de la clase de estabilidad y de la distancia viento abajo, y aplica la función de densidad de probabilidad gaussiana para tener en cuenta los movimientos y difusión del penacho. Fue publicado en varias formas por la EPA de los Estados Unidos como parte de la serie UNAMAP a finales del decenio de 1960, y sigue evolucionando en todo el mundo. Puede aplicarse a penachos o bocanadas individuales y, por ello, proporciona la necesaria flexibilidad para modelización de la calidad del aire local. Ha sido adaptado para fuentes puntuales, lineales y de área. En su forma básica para fuentes puntuales, para un penacho, la concentración (c) se predice con la siguiente expresión matemática:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\}$$

Ec. 5-A1-1

- 
1. Reynolds, O. “On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie A, Volumen 186, 1895, pp. 123–164 (doi:10.1098/rsta.1895.0004).
  2. Taylor, G.I. “Eddy motion in the atmosphere”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie A, Volumen 215, 1915, pp 1–26 (10.1098/rsta.1915.0001).
  3. F. Pasquill, *Atmospheric Diffusion: the dispersion of windborne material from industrial and other sources*, D. Van Nostrand Company Ltd. Londres 1962.

donde:

- $Q$  = intensidad en la fuente;
- $u$  = velocidad del viento;
- $H$  = altura de la fuente sobre el nivel del suelo más elevación del penacho; y
- $\sigma_y, \sigma_z$  = coeficientes de dispersión horizontal y vertical.

4. Cabe señalar que  $x$ , la distancia viento abajo, se incluye implícitamente en los coeficientes de dispersión horizontal y vertical que aumentan dicha distancia.

5. Fórmulas del modelo gaussiano más recientes han utilizado una distribución bigaussiana en el eje vertical para tener más en cuenta la mezcla vertical en condiciones convectivas. Esto da como resultado una mayor exactitud, pero también un modelo más complejo.

#### Difusividad de remolino basada en la ecuación de conservación de la masa

6. En este enfoque euleriano, se utiliza la solución aproximada de las ecuaciones que rigen la conservación de la masa con hipótesis de simplificación que relacionan los flujos turbulentos  $\langle u'c' \rangle$  con los gradientes de concentración,  $\partial c / \partial x_i$  incluyendo un término de difusividad de remolino,  $K_i$ . Esto da como resultado:

$$\langle u'c' \rangle = -K_i \left( \frac{\partial c}{\partial x_i} \right)$$

Ec. 5-A1-2

Este enfoque se utiliza para contaminantes de distribución amplia o uniforme cuando no prevalecen grandes penachos individuales. Esto ocurre para contaminantes como el monóxido de carbono. Este enfoque se ha aplicado en la modelización regional en la forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_i}{\partial t} + u_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + u_y \frac{\partial c_i}{\partial y} + u_z \frac{\partial c_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) \\ + R_i(c_1, c_2, \dots, c_n) + E_i(x, y, z, t) - S_i(x, y, z, t) \end{aligned}$$

Ec. 5-A1-3

donde:

- $u_x, u_y, u_z$  = velocidad;
- $c_i$  = concentración de la especie  $i$ -ésima;
- $R_i$  = velocidad de generación química de la especie  $i$ ;
- $E_i$  = flujo de emisiones; y
- $S_i$  = flujo de transferencia.

### Modelo de cajas

7. El modelo de cajas es una representación matemática sin pista de un volumen de aire (la caja) bien mezclado y definido que comprende las entradas y salidas al volumen. Dado que la caja está bien mezclada, la concentración de salida es equivalente a la concentración dentro de la caja. Pueden utilizarse varias cajas en la horizontal o vertical con la salida de una caja representando la entrada de la siguiente en un enfoque de cuadrícula. Pueden considerarse reacciones químicas en cada caja. Esto permite utilizar la fórmula de conservación de la masa para cada caja en este método Euleriano.

### Modelos de trayectoria

8. Estos modelos, basados en el enfoque lagrangiano, proporcionan una solución aproximada aplicando las ecuaciones que rigen la conservación de la masa y un sistema de coordenadas que se mueve con la velocidad media del viento. Este enfoque implica que la integridad de la parcela se mantiene razonablemente durante el tiempo de simulación del modelo y supone que la cizalladura del viento horizontal, las difusiones turbulentas horizontales y el transporte advectivo vertical son despreciables. Este modelo no se acepta normalmente para uso general en aplicaciones de reglamentación en Estados Unidos.

### Modelos de masa y momento

9. En este tipo de modelo, las ecuaciones que rigen la masa y el momento se aplican utilizando principios de primer orden. Por ejemplo, los enfoques pueden comenzar con la ecuación fundamental de Navier-Stokes e incluir la turbulencia basada en los promedios de Reynolds. El resultado es más riguroso desde el punto de vista científico con procedimientos complejos que evitan la simplificación de la teoría K pero a menudo exigen un uso intensivo de computadoras y datos y son específicos de cada caso particular. En este contexto, esta categoría de modelos tiende a orientarse más a la investigación y no al uso común.

### Modelos de partículas lagrangianos

10. En contraste con los modelos gaussianos, que se basan en una solución analítica de la ecuación de dispersión clásica, y los modelos eulerianos, que resuelven la ecuación por medios médicos, los modelos de partículas lagrangianos simulan el proceso de transporte en sí.

11. Del enorme número de partículas (gases, aerosoles, polvo) emitidas normalmente por una fuente, sólo se considera una pequeña muestra representativa. El tamaño de la muestra es en general del orden de algunos millones de partículas, dependiendo del problema y de los recursos de computadora disponibles. La trayectoria de cada una de estas partículas se calcula en la computadora mediante un proceso estocástico (proceso de Markov en espacio de fase). De estas trayectorias, se obtienen la distribución de las concentraciones, tridimensional, dependiente del tiempo y no estacionaria.

12. El núcleo de un modelo de partículas lagrangiano, por ejemplo el especificado en la directriz VDI 3945/3 (en alemán/inglés, véase [www.vdi.de](http://www.vdi.de)), no contiene parámetros ajustables. Se basa en parámetros meteorológicos que pueden determinarse sin experimentos de dispersión. Las escalas temporales normalmente van desde algunos minutos a un año con resolución temporal hasta de algunos segundos; las escalas espaciales van desde algunos metros a unos 100 kilómetros.

13. La creciente investigación y aplicación a la física de la atmósfera se inició hace unos treinta años, y los modelos de partículas lagrangianos han pasado a ser de amplio uso con las mayores velocidades de la computadora y almacenamiento en memoria. Actualmente, esta técnica se aplica con carácter rutinario al control de la calidad del aire.

### **Enfoque de penacho en cuadrícula**

14. Este método es un híbrido entre los enfoques lagrangiano y euleriano. El enfoque euleriano se adapta utilizando modelos de trayectoria adaptados en técnicas de dispersión gaussianas para preservar las concentraciones de especies traza a efectos de superar las deficiencias relativas a la mezcla instantánea de contaminantes en la cuadrícula.

### **Modelos de clausura**

15. En los modelos eulerianos debe tratarse la difusión vertical. Normalmente se utilizan dos esquemas de clausura turbulenta diferentes: clausura local y clausura no local. La clausura local supone que la turbulencia es similar a la difusión molecular mientras que la clausura no local supone que el flujo turbulento es similar a las cantidades medias en diferentes capas y se permite un intercambio de masas. Los modelos de clausura se analizan generalmente en términos de modelos de primer orden para ecuaciones de pronóstico de las variables medias (p.ej., viento o temperatura) o modelos de orden superior que son más complejos. Este tipo de modelización se relaciona estrechamente con los modelos de difusividad de remolino descritos anteriormente.

### **Modelos estadísticos**

16. Esta idea se basa en el análisis estadístico de las mediciones de los contaminantes ambientales y otra información sobre emisiones. Este enfoque se aplica mejor cuando se dispone de información detallada sobre las fuentes debido a que con estos modelos es difícil aplicar los resultados a medida que cambian los parámetros de lugar. Un subconjunto de este tipo de modelo es el modelo de receptores que se ha venido utilizando para la predicción de materia particulada en los Estados Unidos y en el Reino Unido. La modelización de receptores utiliza métodos estadísticos de variables múltiples para identificar y cuantificar el prorrato de los contaminantes atmosféricos respecto de sus fuentes.

17. En resumen, esta lista parcial de procedimientos tiene por objeto proporcionar material para el análisis de los modelos de dispersión y permitir que el analista comprenda mejor los procesos en cuestión.

-----

## Apéndice 2 del Capítulo 5

### MODELOS DE DISPERSIÓN UTILIZADOS COMÚNMENTE EN LAS INMEDIACIONES DE LOS AEROPUERTOS

1. Este apéndice no tiene por objeto recomendar ningún modelo de dispersión en particular ni proporcionar información detallada sobre cualquiera de ellos. Se espera que el analista escoja el modelo más apropiado sobre la base de sus requisitos legislativos, datos disponibles e intenciones de uso.
2. En la Tabla 5-A2-1 se muestran los paquetes de modelos de dispersión computadorizados que se han venido utilizando comúnmente en los aeropuertos. Cabe señalar que existen muchos modelos que se han utilizado y que la tabla en cuestión no incluye a todos.

**Tabla 5-A2-1. Modelos de dispersión utilizados comúnmente en los aeropuertos**

<i>Modelo de calidad del aire en el aeropuerto</i>	<i>Modelo de tipo de dispersión fundamental</i>	<i>Información sobre el modelo</i>
AEDT/EDMS	Bi-gaussiano	Organización patrocinadora: Estados Unidos Elaborador del modelo: FAA
ADMS-Airport	Bi-gaussiano	Organización patrocinadora: Reino Unido Elaborador del modelo: CERC
Open ALAQS	Bi-gaussiano/lagrangiano	Organización patrocinadora: Francia Elaborador del modelo: EUROCONTROL
LASPORT	Lagrangiano	Organizaciones patrocinadoras: Alemania y Suiza Elaborador del modelo: Janicke Consulting

3. Resulta obvio en estos paquetes de modelización que ningún enfoque de modelización satisface totalmente todas las actuales necesidades en la materia, especialmente si se consideran los factores de costo, viabilidad y complejidad. Esto da como resultado que se utilicen múltiples modelos y que se seleccionen caso por caso o que se adapten o simplifiquen los datos de entrada a los modelos seleccionados.
4. Al seleccionar el modelo de dispersión apropiado el analista debería examinar cuidadosamente los requisitos legislativos que pudiera haber, las fuentes que han de modelizarse, los datos de entrada necesarios para cada modelo específico y las limitaciones de cada uno de ellos.

-----





## Apéndice 3 del Capítulo 5

### FUENTES DE INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

1. Para los modelos de dispersión que utilizan el enfoque avanzado o el enfoque sofisticado, se requieren datos meteorológicos detallados. Esos datos deben seleccionarse cuidadosamente. Es posible que los datos a corto plazo no muestren con exactitud las tendencias, y quizás no sean representativos de las variaciones estacionales, pautas de viento dominantes o variaciones diurnas.
2. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), más de 10 000 estaciones meteorológicas de superficie con personal y automáticas, 1 000 estaciones en altitud, 7 000 barcos, 100 boyas fijas y 1 000 boyas a la deriva, cientos de radares meteorológicos y 3 000 aeronaves comerciales especialmente equipadas miden diariamente los parámetros clave de la atmósfera y de la superficie terrestre y oceánica<sup>1</sup>. Se dispone de información de muchos años, y ya existían bases de datos antes de 1950.
3. El Sistema de Centros de Datos Mundiales para la meteorología ([http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/GCDS\\_5.php](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/GCDS_5.php)), con 52 centros en 12 países, representa a una enorme cantidad de estaciones de monitoreo en todo el mundo.
4. Cada país también puede mantener actualizados los datos climatológicos requeridos para una región o país. Entre los centros mundiales, se incluyen el Centro Británico de Datos Atmosféricos<sup>2</sup> del Reino Unido y los Centros Nacionales de Información Ambiental (NCEI, por su sigla en inglés)<sup>3</sup> de los Estados Unidos. Los NCEI tienen datos de superficie, en altitud y otra información útil directamente descargables en múltiples formatos. Tienen importancia los registros históricos acopiados durante muchos años que ayudan a evitar errores debidos a la entrega incorrecta de parámetros. Hay datos disponibles a partir de los años 1800 hasta el presente para más de 8 000 lugares en Estados Unidos y 15 000 estaciones en el mundo dependiendo de los datos requeridos.
5. En muchas universidades del mundo también pueden encontrarse datos climatológicos, que a menudo resultan específicos para una región. Se sugiere que el analista explore estas posibilidades para obtener información.

---

1. "Observations," World Meteorological Organization (WMO), <https://public.wmo.int/en/our-mandate/what-we-do/observations>, (junio de 2020).

2. <http://www.ecn.ac.uk/links/link-items/british-atmospheric-data-centre> (junio de 2020).

3. <https://www.ncdc.noaa.gov/> (junio de 2020).



## Capítulo 6

# MEDICIONES DE LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE PARA LOS AEROPUERTOS

### 6.1 INTRODUCCIÓN

Los aeropuertos son una parte importante de la infraestructura económica de las ciudades a las que prestan servicio; las actividades de pasajeros y carga en un aeropuerto apoyan las necesidades locales de transporte por vía aérea. No obstante, como parte de esa infraestructura, los aeropuertos constituyen un verdadero imán para muchos tipos de actividades que contribuyen a la contaminación atmosférica en el área local: aeronaves, automóviles, equipo auxiliar de tierra, fuentes estacionarias, etc. A menudo respondiendo a varios objetivos y requisitos, los aeropuertos o autoridades locales procuran comprender plenamente los efectos de las fuentes contaminantes relacionadas con el aeropuerto sobre la calidad del aire local. Si bien se dispone de mecanismos de modelización, algunos aeropuertos tratan de cuantificar las emisiones relacionadas con sus actividades mediante la realización de mediciones del aire reales. Es importante que las mediciones realizadas para los aeropuertos se ajusten a los protocolos de medición apropiados. En este capítulo se describen los diversos elementos que se aplican a las mediciones de la calidad del aire ambiente en los aeropuertos.

### 6.2 REQUISITOS E IMPULSORES/MOTIVADORES PARA LAS MEDICIONES DE LA CALIDAD DEL AIRE

6.2.1 En el Capítulo 2 del presente manual se describen el marco normativo general sobre calidad del aire local y los impulsores que llevan a la industria de la aviación a proporcionar información o a emprender medidas relacionadas con la calidad del aire. Con aplicación específica a las mediciones de la calidad del aire ambiente, numerosos requisitos e impulsores/motivadores influyen en la necesidad de que se realicen mediciones de la calidad del aire ambiente en los aeropuertos. Las mediciones se llevan a cabo con frecuencia para satisfacer obligaciones jurídicas, como parte de programas voluntarios o para verificación de modelos.

6.2.2 **Cumplimiento de obligaciones jurídicas.** Para cumplir con los reglamentos aplicables sobre calidad del aire ambiente y normas conexas u objetivos respecto de contaminantes particulares, los aeropuertos y, en algunos lugares, las autoridades locales pueden tener que realizar mediciones ambientales. Un aeropuerto o una autoridad local también puede verse en la obligación de realizar mediciones con carácter regular o irregular (por ejemplo, evaluaciones básicas o en el contexto de proyectos de ampliación).

6.2.3 **Programas voluntarios.** Por ejemplo, las preocupaciones públicas y comunitarias a menudo impulsan la necesidad de realizar mediciones para obtener información real sobre la calidad del aire en las inmediaciones del aeropuerto. Por otra parte, el aeropuerto puede realizar mediciones con carácter voluntario y notificar sus resultados como parte de su política ambiental y actividades de gestión.

6.2.4 Además de las preocupaciones públicas y comunitarias, pueden surgir nuevas pruebas o hipótesis científicas que sugieran la iniciación de campañas de medición en los aeropuertos o entorno de los mismos para aclarar conceptos u obtener más información.

6.2.5 **Verificación de modelos.** A veces los resultados de los modelos se calibran con resultados medidos para determinar la capacidad de un modelo en cuanto a la caracterización de las condiciones presentes con cierto grado de confianza. Una vez que se verifican las condiciones básicas de un modelo particular, este puede utilizarse con mayor confianza para predecir escenarios futuros con exactitud. Esto resulta de particular importancia cuando un aeropuerto está considerando posibles medidas (por ejemplo, desarrollo de infraestructura) y tiene que analizar las posibles consecuencias de las mismas y de toda posible medida de mitigación.

6.2.6 La principal aclaración que ha de formularse con respecto a la verificación de modelos es el hecho de que éstos normalmente predicen concentraciones de una o varias fuentes de emisión, pero no necesariamente de todas las fuentes contribuyentes. En este caso, puede ser difícil comparar las concentraciones modelizadas con los valores medidos, y habrán de aplicarse procedimientos complejos para llevar a cabo realmente las verificaciones de modelo.

### 6.3 PLAN DE MEDICIONES

#### Proceso de diseño de un plan de mediciones

6.3.1 El plan de mediciones de la calidad del aire local o regional está determinado por los requisitos externos o internos y los recursos necesarios disponibles. Los siguientes son los principales elementos de un plan de medición que han de tratarse (véase también la Figura 6-1):

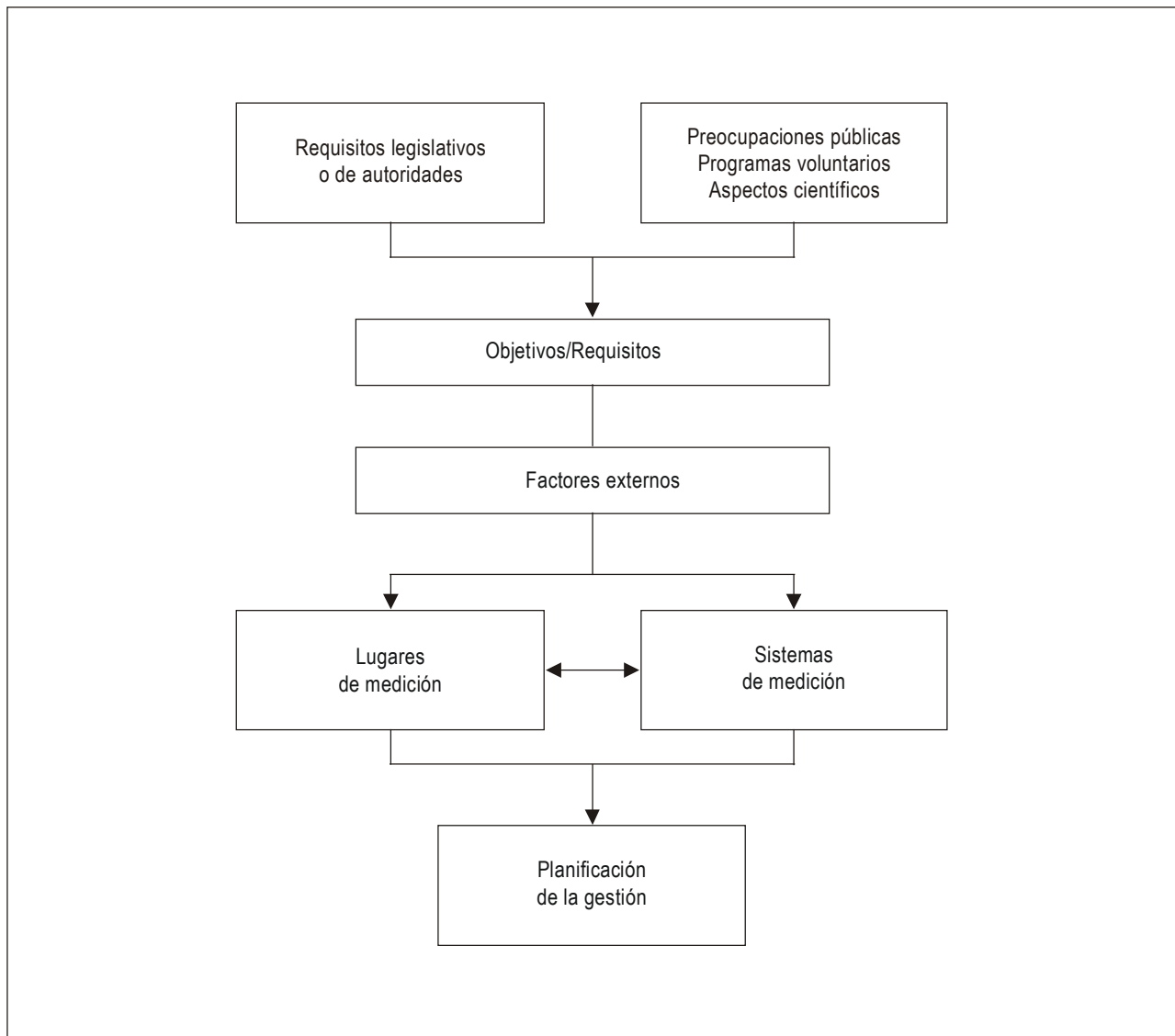
- a) objetivos y requisitos de las mediciones (según se describe en 6.2);
- b) factores externos;
- c) lugares de medición (con respecto a los locales aeroportuarios);
- d) métodos de medición; y
- e) planificación de la gestión.

6.3.2 En términos de requisitos externos, los aeropuertos pueden tener objetivos únicos o múltiples para las mediciones, incluyendo el deseo de obtener información concreta sobre las condiciones reales que afectan a la calidad del aire ambiente en lugares receptores y específicos para fines de comunicación o para establecer un análisis de tendencias a largo plazo a efectos de observar el desarrollo de la calidad del aire en los sitios de medición en respuesta a la liberación de emisiones.

#### Factores externos

6.3.3 Los factores externos principales que han de considerarse en las mediciones de la calidad del aire ambiente son las normas, recomendaciones y directrices sobre las mediciones que puedan existir. Si corresponde, debería utilizarse documentación marco viable o disponible, con carácter local o nacional, para las mediciones de la calidad del aire ambiente. Esta puede variar desde aspectos generales, principios de medición o garantía de calidad a sistemas de medición prescritos que habrán de implantarse.

6.3.4 En algunos casos, los aeropuertos tendrán la responsabilidad de las mediciones de la calidad del aire y de los costos correspondientes. A estos efectos, los recursos disponibles, pericia técnica y presupuesto pueden ser factores que determinen el posible alcance de las mediciones de la calidad del aire.

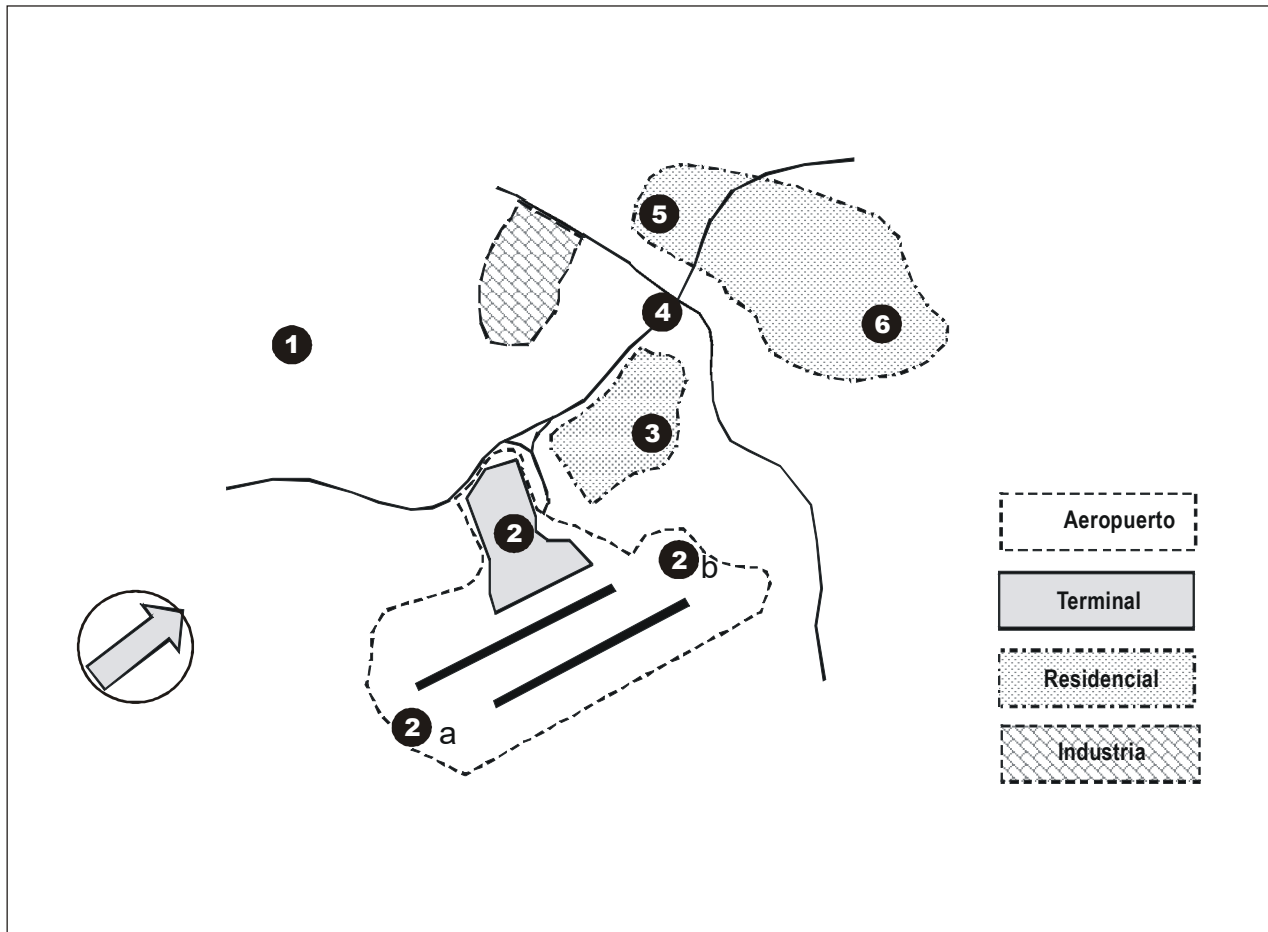


**Figura 6-1. Elementos del plan de mediciones**

6.3.5 Una red de monitoreo de la calidad del aire ya puede estar instalada y operada por autoridades locales u otras entidades. En este caso, sería aconsejable coordinar o incluso armonizar los posibles planes de medición para evitar la duplicación de mediciones similares o idénticas o para evitar incoherencias e incluso contradicciones.

### Lugares de medición

6.3.6 Los objetivos y requisitos descritos en 6.2 contribuirán a determinar el emplazamiento de las estaciones de monitoreo. En la Figura 6-2 se ilustra un plan de selección de emplazamientos genérico, aunque típico, en el que se describe y justifica cada ubicación en la Tabla 6-1. El plan de selección de emplazamientos puede variar de aeropuerto en aeropuerto dependiendo de los usos de terreno, infraestructura y desarrollos regionales reales.



**Figura 6-2. Plan genérico de selección de lugares de medición**  
(flecha en círculo: dirección del viento dominante)

6.3.7 Las mediciones del aire deberían realizarse contra el viento y a favor del viento a partir del aeropuerto o de las fuentes del mismo tratando al mismo tiempo de lograr una discriminación en la distribución de las fuentes. Para lograr esta discriminación en la distribución de las fuentes, deberían definirse los lugares que estén más probablemente dominados por una fuente de emisiones específicas, mientras que las otras fuentes pueden contribuir sólo marginalmente a las concentraciones generales.

6.3.8 Las preguntas siguientes se relacionan con la elección de lugares de medición:

- ¿Cuáles son las concentraciones actuales (pasadas) de las especies pertinentes cerca del aeropuerto?
- ¿Pueden destacarse, al menos en cierto grado, consecuencias inducidas por el aeropuerto?
- ¿Cuál es la tendencia de las concentraciones de contaminación?

6.3.9 Al elegir los emplazamientos en el aeropuerto y alrededor del mismo con respecto a los contribuyentes a la contaminación más probablemente dominantes, puede ser posible estimar cualitativamente la pertinencia de las consecuencias inducidas por el tránsito aéreo y por el aeropuerto.

### Métodos de medición

6.3.10 Se dispone de varios métodos de medición que pueden variar desde simple (en términos de lugar y manipulación) a sofisticado. La elección de cada instrumento debe hacerse con arreglo a las exigencias previstas de la medición, cuya definición se basa en el análisis de la demanda de los clientes o de las autoridades cuando no es obligatoria por ley. En todo caso, el riesgo de proporcionar un resultado equivocado cuando se compara con un umbral debe analizarse y aceptarse por todas las “partes”.

6.3.11 La diferencia principal entre los sistemas de medición es si son activos (el sistema recoge muestras del aire y las analiza continuamente) o pasivos (el aire ambiente reacciona con el sistema y los resultados se obtienen a distancia). En la Tabla 6-2 se analizan ambos enfoques sistemáticos en términos de diversos parámetros que deben considerarse cuando se evalúen los sistemas de medición.

6.3.12 Al considerar posibles sitios en combinación con sistemas de medición, puede llegarse a la conclusión de que los sitios en el aeropuerto pueden equiparse con sistemas activos o pasivos, mientras que las mediciones de la calidad del aire en la región del aeropuerto deberían realizarse con sistemas pasivos.

**Tabla 6-1. Descripción de lugares de medición genéricos**

Núm. (de la Figura 6-2)	Descripción del lugar	Justificación
1	Sitio de concentración de fondo, no perturbado por actividades contaminantes.	Esta estación proporciona los datos de fondo y básicos para la región donde está situado el aeropuerto.
2	Todas las estaciones (incluyendo 2 a) y 2 b) están emplazadas dentro del área del aeropuerto con intensas actividades aeroportuarias. Con carácter opcional, las estaciones están emplazadas directamente a favor del viento y contra el viento (y al lado) de las pistas, a menudo en los límites del aeropuerto.	Puede esperarse que las estaciones reflejen muy probablemente mejor las actividades aeroportuarias (aeronaves o servicios de escala e infraestructura). Estas actividades dominarán las concentraciones de contaminantes, y los cambios importantes en las concentraciones probablemente se deban a estas fuentes.
3	La estación está emplazada en una zona residencial ubicada a favor del viento respecto del aeropuerto, pero sin fuentes dominantes de emisiones en sus proximidades.	Esta estación proporcionará la situación promedio de un área residencial con viviendas permanentes cercanas al aeropuerto y a favor del viento respecto del mismo. Puede no ser posible atribuir fuentes pero ello no es necesario.
4	La estación está emplazada cerca de una carretera con tránsito importante, pero todavía en las proximidades del aeropuerto.	El tránsito carretero es una importante fuente de emisiones en general. Esta estación refleja las consecuencias del tránsito carretero sobre la calidad del aire local en las inmediaciones del aeropuerto. No se distingue entre el tránsito relacionado con el aeropuerto y cualquier otro tránsito.
5	La estación está ubicada en otra área residencial, pero a favor del viento de un área industrial con emisiones.	Las áreas residenciales podrían todavía estar sometidas a concentraciones crecientes. En este caso, es importante discriminar las fuentes de emisiones que no están relacionadas con el aeropuerto pero que pueden tener consecuencias sobre áreas cercanas al mismo.
6	Esta estación está emplazada más lejos del aeropuerto, pero también en un área residencial a favor del viento con respecto a éste.	Cabe esperar que más lejos del aeropuerto, las concentraciones disminuirán siempre que no existan otras fuentes de emisiones importantes.



### Planificación de la gestión

6.3.13 Un elemento importante de las emisiones de la calidad del aire ambiente es asegurar que la aplicación y ejecución real se tienen adecuadamente en cuenta. A estos efectos, deben tratarse, definirse y documentarse varios elementos en la planificación de la gestión, entre ellos los siguientes:

- a) responsabilidad del proyecto;
- b) mantenimiento;
- c) gestión de los datos;
- d) comunicación; y
- e) garantía de calidad y control de calidad.

6.3.14 La responsabilidad del proyecto comprende, entre otras cosas, la redacción del concepto de medición, la adquisición del presupuesto necesario para la compra, instalación, operación y mantenimiento del equipo de medición, la organización de la gestión de los datos (evaluación, verificación, almacenamiento) y la administración de posibles contratos con terceros. Define las funciones y responsabilidades de todas las partes involucradas.

6.3.15 El mantenimiento involucra todos los elementos del mantenimiento regular y preventivo del equipo de medición, así como las reparaciones, y la planificación para posibles contingencias incluyendo equipo de repuesto disponible. También abarca la calibración del equipo con arreglo a las instrucciones del fabricante o directrices y recomendaciones generales.

6.3.16 La gestión de los datos comprende la adquisición de éstos (automática o manual), su almacenamiento o su transferencia (por ejemplo, desde estaciones controladas a distancia). Una vez obtenidos los datos brutos, se someten a verificaciones de calidad que deben definirse previamente, donde los datos inapropiados se identifican y se marcan o se eliminan de la serie de datos. Dependiendo del sistema de adquisición de datos y del intervalo requerido de evaluación y notificación, los datos pueden tener que reunirse en un intervalo diferente (por ejemplo, valor horario).

6.3.17 Una vez que los datos están disponibles para su adecuada interpretación, pueden tener que comunicarse o publicarse. Pueden producirse informes de medición públicos o de carácter reservado y distribuirse como material impreso o en forma electrónica. Además, pueden definirse con antelación los modos de comunicación con las autoridades o partes interesadas locales.

6.3.18 Para asegurar la calidad a largo plazo de los datos medidos, se recomienda implantar un proceso de garantía de calidad en el que se traten todos los elementos que influyen en la calidad de los datos. Dicho sistema de control de calidad se elabora e implanta para asegurar que se logra el nivel requerido de confianza en el sistema y sus resultados.

## 6.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS

### Introducción

6.4.1 Los datos de medición del aire ambiente pueden utilizarse para varias funciones, a saber:

- a) describir las condiciones existentes en un área o lugar y demostrar si se satisfacen o no las normas de calidad del aire ambiente;
- b) determinar variaciones horarias, diarias, mensuales y estacionales;
- c) determinar tendencias espaciales y temporales; y
- d) identificar las fuentes principales que contribuyen a las concentraciones medidas.

6.4.2 La forma en que se utilicen los datos depende de los factores siguientes:

- a) contaminantes específicos o constituyentes que fueron medidos;
- b) duración (días, semanas, meses o años) de las mediciones;
- c) resolución temporal (segundos, minutos, horas o más) de las mediciones;
- d) número y ubicación de los sitios de monitoreo utilizados para recoger las mediciones; y
- e) datos meteorológicos (por ejemplo, velocidad y dirección del viento).

**Tabla 6-2. Sistemas de medición activos y pasivos**

Parámetro	Sistema activo	Sistema pasivo <sup>1</sup>
Sistemas posibles	<p>Trayectoria óptica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS)</li> </ul> <p>Punto continuo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microbalanza oscilante de elemento cónico (TEOM)</li> <li>• Monitor de masa por atenuación Beta</li> <li>• Muestras de gran volumen</li> <li>• Quimioluminiscencia</li> </ul>	<p>Bolsas o cajas metálicas</p> <p>Tubos de difusión pasiva</p> <p>Papeles filtro</p>
Especies de contaminación que han de medirse	Normalmente, en una estación pueden medirse múltiples especies (por ejemplo, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> ) utilizando varios analizadores en un lugar.	Normalmente solo puede medirse un contaminante. Algunos contaminantes no pueden medirse en absoluto (reactividad).
Análisis	Normalmente las muestras de aire se analizan directamente en la estación y en el momento en que se toman.	Las muestras se analizan normalmente a distancia en un laboratorio y después de la recolección.
Intervalos de medición	Dependiendo del equipo, los intervalos de medición pueden ser breves; por ejemplo, las muestras pueden analizarse cada pocos segundos o minutos.	Los intervalos son normalmente largos (por ejemplo, intervalos de dos semanas) o sólo mediciones únicas.
Exactitud de los datos	La exactitud de los datos obtenidos es normalmente bastante elevada, siempre que exista una instalación y mantenimiento adecuados de los sistemas.	La exactitud de los datos medidos es mediana. No obstante, para análisis de tendencias o comparaciones con un mayor número de sitios, esta exactitud puede ser suficiente.
Requisitos del emplazamiento	El emplazamiento de medición requiere una ubicación sin obstrucciones (con respecto al flujo atmosférico), una sala protegida para el equipo y analizadores y acceso a energía eléctrica. Dependiendo del sistema, también se necesitan líneas de comunicación para operaciones a distancia. Deberían aplicarse algunas restricciones de acceso. Estos sistemas también pueden ser móviles para campañas de medición.	El emplazamiento de medición requiere una ubicación sin obstrucciones (con respecto al flujo atmosférico). Sólo se requiere una infraestructura limitada para instalar el sistema de medición (sin protección y sin electricidad).
Mantenimiento	Se requiere un mayor nivel de mantenimiento en las partes eléctricas, electrónicas y de precisión para obtener y mantener un nivel de funcionamiento fiable. Esto puede comprender la calibración o cambios regulares de partes críticas.	Las actividades de mantenimiento son normalmente pocas debido a que no existen partes eléctricas, electrónicas o de alta precisión o éstas son sólo limitadas.
Costo	Medio a elevado (inversiones) y medio (mantenimiento).	Bajos (inversiones y mantenimiento).
<p>1. Bioindicadores y bioacumuladores: Esta categoría es más un híbrido de sistema activo y exposición a largo plazo. En el Apéndice 1 de este capítulo se brinda una descripción limitada.</p>		

### **Descripción de las condiciones existentes respecto del cumplimiento de las normas sobre calidad del aire ambiente**

6.4.3 La vigilancia de la calidad del aire ambiente es el método tradicional para demostrar que un área cumple actualmente las normas de calidad del aire aplicables. A menudo, el monitoreo debe realizarse de uno a tres años antes de una designación y determinación formales de que el área cumple, o no, una norma. Los órganos de reglamentación han definido la forma en que pueden utilizarse los datos para comparar los resultados de la vigilancia con las normas de calidad del aire.

6.4.4 El monitoreo en uno o más lugares cerca de un aeropuerto proporciona información con respecto a la calidad del aire local en las inmediaciones del mismo. Estos datos pueden utilizarse para definir condiciones existentes o básicas en un documento de información ambiental para un proyecto futuro propuesto. Dado que las normas sobre calidad del aire comprenden el período de promedio, y que los períodos de promedio para ciertas normas pueden ser de hasta un año, el monitoreo debe realizarse para el período apropiado a la norma con la cual se compararán los datos. Puede requerirse un monitoreo de mayor duración si la norma se basa en un número limitado de mediciones que puede excederse a lo largo de varios años.

### **Determinación de las variaciones periódicas**

6.4.5 Las variaciones periódicas pueden dar algunos indicios sobre las fuentes que pueden estar contribuyendo a las concentraciones medidas. Cada fuente en el aeropuerto tiene sus propias "horas pico". Por ejemplo, el tránsito de superficie regional suele tener un período pico matutino o vespertino en función del trabajo. Las operaciones de aeronaves a menudo presentan horarios pico bien definidos. El acceso de los vehículos terrestres a un aeropuerto puede llegar a valores máximos de 60 a 90 minutos antes y después de los máximos de operaciones de aeronaves. Si se dispone de datos con seguimiento horario, y esos datos muestran períodos pico de concentraciones de contaminantes que se corresponden en el tiempo con los períodos de mayor afluencia vehicular, entonces el tránsito probablemente sea un contribuyente importante a los valores medidos. Cabe aclarar que esto supone que se trata de un contaminante relativamente inerte (como CO, PM<sub>10</sub> o NO<sub>x</sub> total).

6.4.6 La variación también puede ocurrir según el día de la semana, el mes del año o la estación. Estas variaciones también ayudan a destacar las fuentes o tipos de fuente que pueden ser contribuyentes importantes a las concentraciones medidas. No obstante, cabe señalar que las variaciones periódicas también pueden estar relacionadas con efectos meteorológicos, como la temperatura, la altura de mezcla o la humedad relativa que realmente cambian las emisiones de contaminantes de las fuentes. Por ejemplo, las fuentes de combustión producen más NO<sub>x</sub> y menos CO cuando la temperatura del aire ambiente es más elevada, produciendo fluctuaciones horarias diurnas y variaciones estacionales.

6.4.7 Un ejemplo típico de variación dependiente de la fuente es la concentración de contaminantes de las aeronaves. Puede haber aeropuertos con tránsito estacional bien determinado (destinos de deportes de invierno) o incluso tránsito de fin de semana. Un ejemplo típico de variación que corresponde a las condiciones meteorológicas es el de una planta eléctrica de aeropuerto que funcione con condiciones de carga relativamente regulares durante todo el año.

### **Análisis de tendencias**

6.4.8 Los análisis de gradiente espacial utilizan mediciones del aire ambiente de un único contaminante efectuadas en varios lugares para identificar y ubicar fuentes de emisiones que contribuyen a las mediciones.

6.4.9 Los análisis de series cronológicas utilizan mediciones del aire ambiente de un único contaminante tomadas a varios lugares para identificar pautas de concentraciones de contaminantes con el tiempo.

6.4.10 La recolección de datos a largo plazo (muchos años) en un emplazamiento puede proporcionar información sobre las tendencias generales de las emisiones de contaminantes. En muchas áreas donde se han implantado programas de control de la contaminación, la tendencia a largo plazo indica continuas reducciones en las concentraciones de contaminantes medidas con el tiempo.

### **Distribución proporcional de las fuentes**

6.4.11 La distribución proporcional de las fuentes es el uso de concentraciones monitoreadas o modelizadas, con o sin datos meteorológicos, para determinar las fuentes, tipos de fuentes o emplazamientos de fuentes que contribuyen considerablemente a los valores medidos. El gradiente espacial y los análisis de series cronológicas que se mencionaron anteriormente son posibles métodos de distribución proporcional de las fuentes. Otros métodos comprenden el equilibrio de masa química o la factorización positiva de matrices.

6.4.12 El uso de datos monitoreados para determinar fuentes que contribuyen a las mediciones se conoce como modelización del receptor. Los datos del receptor (estación de monitoreo) se analizan conjuntamente con datos de velocidad del viento o de dirección del viento o perfiles de emisiones de tipo fuente supuestos, así como características para obtener información sobre las fuentes o tipos de fuentes que generan las emisiones que se miden en la estación en cuestión.

6.4.13 Las mediciones efectuadas en un punto no permiten distinguir entre diferentes fuentes contribuyentes a menos que pueda aislarse una sustancia trazadora emitida desde una fuente específica solamente. Por consiguiente, es importante realizar la modelización conjuntamente con las mediciones para poder estimar la contribución de cada fuente o grupos de fuentes (por ejemplo, un aeropuerto).

### **Tratamiento de los datos ausentes**

6.4.14 Las directrices locales o nacionales normalmente establecen las condiciones requeridas bajo las cuales las series cronológicas medidas son válidas. Para mediciones a largo plazo (por ejemplo, anuales), se asigna un número de días máximo en los que no se han de tomar medidas específicas. Las brechas más allá de esta tolerancia conducirán a series de mediciones o períodos de promedio inválidos. Los datos obtenidos pueden utilizarse para fines de información, pero no para notificación jurídica o justificación de programas de mitigación. Cuando dichas directrices lo permiten, puede insertarse los datos ausentes mediante interpolación. En todos los casos, debería documentarse claramente las brechas de datos.

6.4.15 La interpolación de uno o varios datos ausentes puede realizarse consultando un período de mediciones válido de una estación cercana con condiciones meteorológicas comparables y aplicando la variación en los puntos de medición de manera correspondiente. En cualquier caso, deberá indicarse claramente cuáles son los datos interpolados.

## **6.5 GARANTÍA DE CALIDAD/CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEDICIONES**

### **Directrices de gestión de la calidad**

6.5.1 Uno de los objetivos principales de la gestión de la calidad es proporcionar confianza en que las mediciones son exactas para evitar críticas cuando se comunican los resultados. El proceso de gestión de la calidad ayudará a minimizar las incertidumbres mediante la optimización de la actuación del equipo, así como de las capacidades del técnico. Además, los resultados de monitoreo deben estar fácilmente disponibles, deben ser trazables, bien identificados, documentados y puntuales en cuanto a la hora y la ubicación.

6.5.2 Existen varias directrices relativas a especificaciones de fabricantes, directrices locales o nacionales o directrices internacionales [Organización Internacional de Normalización (ISO)], entre otras. La Norma ISO 9001, referencia para la gestión de la calidad, se refiere a los procesos para organizar la información de las mediciones que permita lograr la satisfacción del cliente. La Norma ISO 17025, basada en la misma organización y objetivo de la gestión de la calidad que la ISO 9001, y especialmente creada para actividades de medición, agrega la evaluación de la capacidad técnica y es mucho más exigente que la Norma ISO 9001.

### **Competencia técnica**

6.5.3 Un factor importante para asegurar la calidad de las mediciones es la idoneidad y la experiencia del personal que realiza las mismas. En este contexto, deben adquirirse conocimientos técnicos adecuados para todos los elementos del monitoreo de la calidad del aire (instalación de equipo, funcionamiento, mantenimiento y reparaciones) y de manipulación de datos (obtener, almacenar, validar e interpretar los datos). Debería definirse por adelantado y documentarse el nivel de educación mínimo requerido.

6.5.4 Para asegurar el nivel necesario de conocimientos, puede elaborarse un programa de instrucción que comprenda instrucción interna y externa; por ejemplo, por el fabricante del equipo o las autoridades ambientales. Esto es particularmente cierto para los instrumentos de análisis complejos cuyas tecnologías cambian con frecuencia. Se recomienda documentar todos los programas de instrucción (por ejemplo, con arreglo a la ISO 9001). Los programas de instrucción deben aplicarse con carácter repetitivo.

### **Exactitud del equipo**

6.5.5 El fabricante del equipo debe prescribir los procedimientos de mantenimiento (preventivos) necesarios, incluyendo su periodicidad. El mantenimiento preventivo debe programarse regularmente para el equipo a efectos de asegurar una actuación óptima durante el funcionamiento, en particular durante el monitoreo continuo y comunicación de los datos. El mantenimiento preventivo podría incluir, por ejemplo, la limpieza, el cambio de partes específicas del equipo y actualizaciones del soporte lógico. Todas las actividades del mantenimiento deben programarse y documentarse. Además, también deberían documentarse las conclusiones alcanzadas después de cada mantenimiento realizado.

6.5.6 La calibración del equipo es un paso importante y necesario para asegurar que las mediciones son exactas y están dentro del alcance determinado del equipo. La calibración se realiza a intervalos regulares y predefinidos después de cada mantenimiento preventivo y reparación. Cuando se utilicen equipos de calibración adicional o sustancias (gases de referencia), estos también deben ser garantizados o certificados en cuanto a la calidad (por ejemplo, fecha de expiración de los gases de referencia). La temperatura y humedad controladas pueden ser necesarias para determinadas calibraciones y deben respetarse. Toda la información relativa a la calibración del equipo debe registrarse.

6.5.7 A pesar de todas las actividades de mantenimiento y calibración, podrían permanecer algunas incertidumbres. Es importante entender la magnitud de cada una de ellas y el nivel de impacto que podría tener sobre los valores medidos generales a efectos de determinar el grado de fidelidad de los datos finales. Un estudio de incertidumbre podría contribuir a determinar los diversos factores y su pertinencia para las mediciones ambientales y también podría sugerir formas de minimizar la incertidumbre de los datos.

### **Tratamiento de los datos**

6.5.8 Dependiendo de la forma del monitoreo, con el tiempo puede recopilarse un gran volumen de datos brutos que exija una gestión de datos específica. Debe decidirse si tienen que mantenerse datos brutos y datos validados o procesados y por cuánto tiempo. Una forma sugerida sería mantener los datos brutos por un período de por lo menos diez años, mientras que los datos procesados (validados, reunidos, etc.), podrían mantenerse por más de diez años.

6.5.9 El almacenamiento de los datos exigirá un procedimiento de mantenimiento, como la copia regular de los datos de un medio a otro y al mismo tiempo la verificación horizontal en busca de fallas en los mismos (ausentes, falsificados). Este proceso de gestión de datos también debe documentarse.

#### **Acreditación y certificación**

6.5.10 Deben realizarse verificaciones periódicas para cerciorarse de que los procedimientos de gestión se aplican correctamente. Podrían contratarse auditores internos entre los empleados y capacitarlos para esta actividad.

6.5.11 Aún si las compañías externas tienen un sistema de calidad establecido y mantenido, el cliente (por ejemplo, el aeropuerto) tendría que tener confianza en dicho sistema. A estos efectos, la norma mínima actual es una etiqueta de certificación ISO 9001. Además, la Norma ISO 17025 se adapta específicamente a las actividades de medición y, dado que combina la gestión de la calidad basada en directrices de la ISO 9001 con un enfoque claro en la capacidad del técnico, es la mejor manera de asegurar la confianza del cliente.

-----



## Apéndice 1 del Capítulo 6

### DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN SELECCIONADOS

#### 1. SISTEMAS ACTIVOS

##### **Espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS)**

1.1 Con el sistema DOAS es posible obtener mediciones automáticas a lo largo de un trayecto con alta resolución. El principio se basa en la absorción de la luz, dependiente de la longitud de onda, provocada por los gases. El equipo DOAS consta de un emisor y un receptor. Un haz de luz con una longitud de onda de entre 200 y 700 NM se proyecta desde el emisor al receptor y pasa a un analizador a través de un cable de fibra óptica. En el trayecto, los gases específicos absorberán la luz de partes conocidas del espectro. Esto permite que la computadora del analizador mida los gases mediante un espectrómetro. Dentro del espectrómetro, un conjunto de prisma rallador divide la luz en los diferentes espectros. El espectro resultante se compara entonces con un espectro de referencia y la diferencia se calcula expresándose en un polinomio. Con cálculos adicionales, se determina el espectro de absorción diferencial y, finalmente, la concentración del gas particular. Estas mediciones únicas se resumen en valores de treinta minutos. El sistema puede utilizarse para una amplia gama de contaminantes incluyendo el dióxido de nitrógeno, el ozono y el dióxido de azufre.

##### **Microbalanza oscilante de elemento cónico (TEOM)**

1.2 La TEOM permite determinar la fracción de PM<sub>10</sub>-en el polvo. El método TEOM se basa en el principio de que la frecuencia de un filtro oscilante cambia con el aumento de la masa. La TEOM toma muestras del aire de volumen conocido, que pasan a través de un filtro en la parte superior de la unidad de muestreo. Aquí se separa toda la materia particulada con tamaño de partícula mayor de 10  $\mu\text{m}$ . La muestra de aire pasa luego a través de un segundo filtro en el cual se apartan las partículas inferiores a 10  $\mu\text{m}$ . La concentración de PM<sub>10</sub> se calcula a partir de los cambios de frecuencia de la oscilación del filtro. Las mediciones únicas se resumen en valores de treinta minutos.

##### **Monitor de masa de atenuación beta (BAM)**

1.3 El BAM es un monitor continuo de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> más rudo y menos oneroso que la TEOM. Tiene certificación de la EPA de los Estados Unidos (EFQM-0798-122), como método equivalente al método estándar de monitorear PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente. El método BAM utiliza una fuente de carbono radioactivo estable (<sup>14</sup>C, 60 uCi), y mide la atenuación de la radiación beta por la materia particulada depositada en un filtro relacionando la atenuación con la masa depositada en el filtro. Los niveles de PM<sub>10</sub> o PM<sub>2.5</sub> se miden por separado, dependiendo del discriminador de tamaño de partícula instalado antes del dispositivo de recolección del filtro.

##### **Analizador de NO<sub>x</sub>**

1.4 El analizador de NO<sub>x</sub> se utiliza para medir las concentraciones de NO<sub>2</sub>. El analizador toma dos muestras de aire. La primera no se somete a ninguna reacción química, mientras que la segunda pasa a través de un convertidor que reduce el NO<sub>2</sub> a NO. Ambas muestras se analizan en cuanto a NO en una única celda de reacción, donde se mide la quimioluminiscencia producida por la reacción entre NO y O<sub>3</sub>. El instrumento mide en forma alternativa el NO<sub>x</sub> y el NO totales. La diferencia entre ambas lecturas resulta en un valor calculado del NO<sub>2</sub> en el aire ambiente.



### Analizador de O<sub>3</sub>

1.5 En el analizador de O<sub>3</sub> se recogen dos muestras de aire. La primera pasa a través de un catalizador que convierte el O<sub>3</sub> en O<sub>2</sub>. La segunda va directamente a una celda de absorción (medición de referencia). Un detector mide la cantidad de radiación ultravioleta (UV) transmitida. La concentración de O<sub>3</sub> se calcula a partir de los dos valores de referencia. El intervalo de medición es de 30 minutos.

### Conclusiones

1.6 Los analizadores automáticos permiten la medición continua, automática, en línea y en relación al tiempo de los contaminantes del aire, produciendo mediciones de alta resolución de las concentraciones horarias de contaminantes, o mejor, en un punto único. La mayor desventaja de un método de punto/trayecto óptico continuo, como el método DOAS, es el elevado costo relacionado con la adquisición y mantenimiento de los analizadores. En consecuencia, pueden resultar una baja red y una baja resolución espacial en las mediciones. Los laboratorios móviles equipados con analizadores automáticos constituyen una aplicación útil de esta técnica como herramienta para los programas de medición que abarcan varios lugares de interés.

## 2. SISTEMAS PASIVOS

### Tubos de difusión

2.1 Los tubos de difusión son la forma más sencilla y de menor costo para evaluar la calidad del aire local en términos de contaminantes gaseosos y pueden aplicarse para obtener una indicación general de las concentraciones medias de contaminantes a lo largo de esos períodos de tiempo, de una semana o más. Se utilizan más comúnmente para el dióxido de nitrógeno y el benceno (a menudo con tolueno, etilbenceno, m+p-xileno y o-xileno como BTEX), pero también son útiles para medir varios otros contaminantes como el 1,3-butadieno, el ozono y el dióxido de azufre.

2.2 Los tubos de difusión constan en general de un pequeño tubo (tamaño tubo de ensayo) normalmente fabricado de acero inoxidable, vidrio o plástico inerte; un extremo contiene una almohadilla de material absorbente y el otro se abre durante un tiempo de exposición determinado. Después de la exposición, los tubos se sellan y se envían a un laboratorio donde se analizan utilizando varias técnicas que incluyen procesos químicos, espectrográficos y cromatográficos.

2.3 Cabe señalar que el uso de tubos de difusión es una técnica de monitoreo indicadora que no ofrece la misma exactitud que los analizadores automáticos más sofisticados. Además, dado que los períodos de exposición pueden ser de varias semanas, los resultados no pueden compararse con las normas y objetivos de calidad del aire basados en períodos de promedio más breves como las normas horarias. Por la misma razón, no es posible detectar sucesos de cresta con tubos de difusión. Como resultado, si bien los tubos de difusión pueden utilizarse para evaluaciones de períodos más breves, se recomienda que el monitoreo de NO<sub>2</sub> por tubo de difusión, en particular, se lleve a cabo a lo largo de un año entero debido a que, entonces, pueden efectuarse evaluaciones respecto de objetivos para concentraciones medias anuales.

2.4 Los tubos de difusión pueden verse afectados por varios parámetros que pueden causar una sobrelectura o sublectura, con respecto a una medición de referencia y, por esta razón, la mejor práctica consiste en utilizar tres o más tubos en cada punto de monitoreo y colocar un juego con un monitor continuo de referencia existente. De esta manera puede corregirse cualquier desviación refiriendo los resultados al monitor continuo (por ejemplo, monitor quimio-luminiscente para NO<sub>2</sub>), y la comparación entre los tubos podrá identificar cualquier anomalía.

2.5 Es importante elegir correctamente los emplazamientos para el monitoreo oportuno de la difusión, y el área en torno a la ubicación de los tubos debería permitir la libre circulación de aire en torno de los mismos, evitando áreas de turbulencia superior a la normal, como las esquinas de los edificios. También debería tenerse cuidado en evitar superficies que puedan actuar como absorbentes locales del contaminante que se está midiendo y, por esta razón, los tubos de difusión no deberían fijarse directamente sobre paredes u otras superficies planas. También deberían evitarse otras fuentes o sumideros localizados como los escapes de calefactores, respiraderos de aire acondicionado y extractores, así como árboles y otras áreas de vegetación densa.

2.6 El costo relativamente bajo de los tubos de difusión significa que la toma de muestras es factible en un número considerable de puntos sobre un área extensa y esto puede ser útil para identificar tendencias relativas y también regiones de elevadas concentraciones donde pueden llevarse a cabo estudios más detallados. En estas circunstancias, el costo y la dificultad de aplicar un monitoreo continuo más exacto para realizar el mismo estudio lo harían casi seguramente prohibitivo.

### **Bolsas y pequeñas cajas metálicas**

2.7 Para esta técnica de medición, se recoge una muestra de "aire entero" en sitios de medición seleccionados introduciendo una muestra de aire ambiente en algún tipo de recipiente. Normalmente, este podría ser una bolsa, una cubeta de vidrio, un cartucho de acero o una pequeña caja de acero inoxidable. Las cajas de acero inoxidables y las bolsas son los sistemas de recolección más comunes. La recolección de una muestra de aire puede mejorarse con una pequeña bomba eléctrica para llenar la caja con la muestra de aire ambiente.

2.8 Una vez que el gas ha sido recogido en la caja, se analiza fuera del lugar o mediante varios métodos diferentes (por ejemplo, utilizando químicas de soluciones). Los componentes del aire ambiente medidos suelen corresponder a diversas especies de hidrocarburos.

2.9 En torno a la extracción de contaminantes del recipiente de recolección giran normalmente cuestiones de calidad de datos. La extracción es una función de varios parámetros incluyendo la naturaleza química del contaminante, las propiedades de la superficie del recipiente, la presión de vapor del contaminante, la influencia de varios otros compuestos contenidos en la matriz y la capacidad de comenzar la operación con un recipiente no contaminado.

### **Conclusiones**

2.10 Los métodos de muestreo pasivos son simples y rentables y proporcionan un análisis fiable de la calidad del aire con una buena indicación de las concentraciones medias de contaminantes a lo largo de un período de semanas o meses. Otros métodos comprenden el uso de formadores de burbujas para los contaminantes gaseosos y el análisis de metales pesados contenidos en la materia particulada suspendida obtenida en el filtrado.

## **3. OTROS MÉTODOS**

### **Indicadores biológicos**

3.1 Los indicadores biológicos, o bioindicadores, son especies vegetales o animales que proporcionan información sobre cambios ecológicos en los lugares concretos sobre la base de sus reacciones sensibles a los efectos ambientales. Los bioindicadores pueden proporcionar signos de posibles problemas ambientales como la contaminación del aire y el agua, la contaminación de los suelos, el cambio climático o la fragmentación del hábitat. También pueden brindar información sobre el efecto integrado de varias tensiones ambientales y sus efectos acumulativos sobre la salud de un organismo, población, comunidad o ecosistema. Las especies de líquenes son un bioindicador de la calidad del aire comúnmente utilizado.

3.2 Existen varios métodos de investigar las especies de indicadores y a nivel de cada organismo pueden estudiarse los efectos de la bioacumulación. A nivel de la población, pueden también realizarse estudios sobre cambios morfofisiológicos, cambios en los ciclos vitales, salud relativa de las poblaciones y estructuras de poblaciones y comunidades. La marcación y recaptura, el establecimiento de relaciones de sexo y edad y los estudios de punto, línea, gráfica o sin gráfica de la cobertura de vegetación y las frecuencias de las plantas son ejemplos de los métodos ecológicos de campo que se aplican.

3.3 Los datos obtenidos de los métodos de medición tradicionales posibilitan que se controle el cumplimiento de las normas y valores límites de la calidad del aire vigentes. No obstante, los datos sobre concentraciones de contaminantes ambientales no permiten obtener conclusiones directas sobre posibles consecuencias para los humanos y el medio ambiente. Las pruebas de las consecuencias perjudiciales pueden obtenerse con más exactitud mediante el uso de los bioindicadores. Estos también integran los efectos de todos los factores ambientales, incluyendo interacciones con otros contaminantes o condiciones climáticas. Esto permite evaluar el riesgo de mezclas de contaminantes complejas y efectos crónicos que pueden incluso ocurrir por debajo de los valores umbral.

3.4 El uso de plantas bioindicadoras para evaluar los efectos de la contaminación del aire no está muy bien establecido. La insuficiente normalización de las técnicas y, en consecuencia, la baja comparabilidad de los resultados son uno de los motivos principales de la débil aceptación de esta metodología de monitoreo de la calidad del aire.

-----

## Apéndice 2 del Capítulo 6

### EJEMPLOS DE MÉTODOS DE MEDICIÓN

Tabla 6-A2-1. Ejemplos de métodos de medición (de Europa y los Estados Unidos)

Contaminante	Método de referencia	Otros métodos
Dióxido de azufre	Fluorescencia ultravioleta	DOAS
Dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno	Quimioluminiscencia	DOAS
PM <sub>10</sub>	Gravimetría	TEOM (avanzado), atenuación beta, cinta adhesiva (simple)
PM <sub>2.5</sub>	Gravimetría	
Plomo	Gravimetría	
Monóxido de carbono	Correlación de filtro de gas, espectroscopia infrarroja no dispersiva (UE)	
Ozono	Fotometría ultravioleta	DOAS



## Apéndice 3 del Capítulo 6

### REFERENCIAS (SELECCIÓN)

- Administración Federal de Aviación, *Aviation Emissions and Air Quality Handbook*, Versión 3, Actualización 1, FAA-AEE-2014-12, [http://www.faa.gov/regulations\\_policies/policy\\_guidance/envir\\_policy/airquality\\_handbook/media/Air\\_Quality\\_Handbook\\_Appendices.pdf](http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/airquality_handbook/media/Air_Quality_Handbook_Appendices.pdf) (Junio de 2020).
- Aéroport de Paris — Charles de Gaulle, “Campagne de Prélèvement de Dioxyde d’azote par Tubes Passifs,” 2006.
- Carslaw, D.C. et al., “Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport,” *Atmospheric Environment*, 40, 2006, pp. 5424–5434.
- Chow et al., “PM<sub>2.5</sub> chemical composition and spatiotemporal variability during the California Regional PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> Air Quality Study (CRPAQS),” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, D10S04, 2006.
- Environmental Protection Agency, EPA’s ambient air quality measurements guidance.
- Fanning, E. et al., “Monitoring and Modelling of Ultrafine Particles and Black Carbon at the Los Angeles International Airport, Final Report,” ARB Contract No. 04-325, prepared for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency, Sacramento, CA, 2007.
- Henry, R.C. et al., “Locating nearby sources of air pollution by nonparametric regression of atmospheric concentrations on wind direction,” *Atmospheric Environment* 36, 2002, pp. 2237–2244.
- Henry, R.C., “Locating and quantifying the impact of local sources of air pollution,” *Atmospheric Environment* 42, 2008, pp. 358–363.
- Henry, R.C., “Receptor Modelling,” *Encyclopaedia of Environmetrics*, A.H. El-Shaarawi and W.W. Piegorisch (eds.), John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2002.
- RWDI, “Air Quality Study: Phase 4 — Ambient Air Quality Monitoring,” Toronto Pearson International Airport, Toronto, Ontario, Canada, 2003.
- Unique (Flughafen Zürich AG), “Air Pollution Monitoring,” Concept and Description, 2007, [www.zurich-airport.com](http://www.zurich-airport.com) (junio de 2020).
- Yu, K.N. et al., “Identifying the impact of large urban airports on local air quality by nonparametric regression,” *Atmospheric Environment* 38, 2004, pp. 4501–4507.
- Watson, J.G. et al., “Air Quality Measurements from the Fresno Supersite,” *Journal of Air and Waste Management Association*, 50, 2000, pp.1321–1334.
- [www.heathrowairwatch.org.uk](http://www.heathrowairwatch.org.uk) (junio de 2020).



## Capítulo 7

# OPCIONES DE MITIGACIÓN

### 7.1 INTRODUCCIÓN

7.1.1 La necesidad de establecer planes de mitigación con medidas específicas puede motivarse en los requisitos normativos existentes en cuanto a la calidad del aire ambiente, en particular cuando se exceden las normas, o por reglamentos o condiciones establecidas en los permisos para la explotación de aeropuertos o su ampliación.

7.1.2 Las medidas para reducir las emisiones de fuentes aeroportuarias deberían basarse en información proporcionada por inventarios sobre emisiones o información sobre concentraciones. En ese sentido, es fundamental que dicha información esté disponible antes de planificar las medidas.

7.1.3 En este capítulo no se analiza el contenido específico de las medidas o su adecuación. Al diseñar un plan de mitigación deben considerarse las circunstancias locales.

### 7.2 METODOLOGÍA DE LA PLANIFICACIÓN DE LA MITIGACIÓN

#### Marco para medidas de reducción de las emisiones

7.2.1 Las medidas de reducción de las emisiones se dividen normalmente en cuatro categorías estratégicas diferentes: normativas, técnicas, operacionales y económicas, según se describe más extensamente en 7.3. En la Tabla 7-1 se proporcionan ejemplos de cada tipo de estrategia. Es importante señalar que el valor de estas medidas cuando se las aplica a un problema específico debe evaluarse caso por caso, y la mejor manera de actuar podría ser la combinación de varias medidas. Todas las medidas se dirigen a reducir, directa o indirectamente, las emisiones en la fuente.

7.2.2 Las medidas normativas son requisitos obligatorios estipulados en las leyes y reglamentos de la jurisdicción pertinente, que establece normas sobre emisiones o funcionamiento de las fuentes de emisiones.

7.2.3 Las medidas técnicas son cambios en la tecnología relacionadas con las características de las emisiones de ciertas fuentes. Pueden ser medidas relacionadas con la reducción de las emisiones en la fuente directa de las mismas (por ejemplo, vehículos) o pueden también incluir medidas relativas a la infraestructura (por ejemplo, aislamiento, trazado de carreteras).

7.2.4 Las “medidas operacionales” son aquellas que implanta el explotador del equipo, ya sea la línea aérea, la autoridad aeroportuaria, arrendatarios o cualquier otra entidad.



Tabla 7-1. Reseña de las medidas de reducción de emisiones (ejemplos)

Grupo de fuentes	Medidas			
	Normativas	Técnicas (Infraestructura)	Operacionales <sup>1</sup>	Económicas
Aeronaves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normas de la OACI sobre emisiones de los motores, incorporadas a las leyes nacionales de los Estados</li> <li>• Restricciones al funcionamiento de APU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño general del aeropuerto</li> <li>• Cierres de carreteras de alta velocidad</li> <li>• Calles de rodaje paralelas</li> <li>• Gestión de afluencia</li> <li>• PCA de 400Hz en puertas/ estacionamientos de aeronave</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arranque de motores</li> <li>• Mejoras de los horarios</li> <li>• Rodaje con un solo motor o con potencia reducida</li> <li>• Tiempo de marcha lenta de motor reducido</li> <li>• Remolque de aeronaves</li> <li>• Uso reducido de APU</li> <li>• Empuje reducido o no nominal</li> <li>• Lavado de motores</li> <li>• Uso de combustible de reactor alternativo</li> <li>• Medidas ATM específicas del aeropuerto, incluyendo los RNAV, RNP y operaciones en descenso continuo (CDO)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Véase <i>Orientación sobre derechos por emisiones de las aeronaves relacionados con la calidad del aire local</i> (Doc 9884)<sup>2</sup></li> </ul>
Servicio de escala y apoyo a aeronaves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normas sobre emisiones de vehículos motorizados para GSE (según corresponda)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GSE con combustible alternativo (CNG/LNG, LPG, electricidad)</li> <li>• Vehículos de flota de combustible alternativo (CNG/LNG, LPG, electricidad)</li> <li>• Dispositivos de reducción de emisiones (filtros de PM, etc.)</li> <li>• Sistemas de captación de emanaciones gaseosas del combustible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de características operacionales de vehículos</li> <li>• Uso de generadores, GPU, arranque de aire</li> <li>• Intensidad reducida de prácticas de instrucción con fuego real</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derechos por licencias relativos a las emisiones</li> </ul>
Infraestructura y fuentes estacionarias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normas sobre emisiones para instalaciones (por ejemplo, plantas electrógenas, generadores de emergencia)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planta electrógena con bajas emisiones, incinerador (quizás filtros)</li> <li>• Medidas de conservación de energía en las nuevas construcciones y mantenimiento de edificios</li> <li>• Cambio del uso de combustible</li> <li>• Cambio de la altura y emplazamientos de las chimeneas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procedimientos con bajas emisiones para operaciones de mantenimiento (pintura, ensayo de motores, limpieza)</li> </ul>	
Tránsito de acceso de la parte pública	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normas sobre emisiones de vehículos motorizados</li> <li>• Restricciones al funcionamiento en marcha lenta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tránsito público mejorado y conexiones intermodales</li> <li>• Trazado estructural de carreteras</li> <li>• Combustibles alternativos</li> <li>• Senderos especiales para el tránsito público</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presentación /facturación fuera del aeropuerto</li> <li>• Estacionamiento preferencial para vehículos con combustible alternativo</li> <li>• Colas preferenciales para taxis "verdes"</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentivos para compartir vehículos por los empleados</li> <li>• Precios y subsidios para estacionamiento</li> <li>• Incentivos para el tránsito público</li> </ul>

1. Ciertas medidas operacionales indicadas en esta tabla pueden aplicarse con carácter voluntario o normativo. Las leyes de varios Estados difieren con respecto al derecho de las autoridades a nivel regional y local de exigir o reglamentar prácticas operacionales. En circunstancias en que la autoridad tiene jurisdicción legal, puede exigir por reglamentación una determinada práctica operacional (por ejemplo, restricciones a funcionamiento de APU, restricciones a la marcha lenta de vehículos). Cuando no se permite la reglamentación, los esfuerzos de gestión de emisiones pueden constar de consultas informales, acuerdos voluntarios, etc., fomentando la aplicación de tales prácticas y evaluando la medida y las consecuencias ambientales de su uso. Cuando la autoridad aeroportuaria es el propietario o explotador de la fuente de emisiones que interesa, tiene autoridad, con arreglo a su mandato jurídico, de seleccionar e implantar opciones viables.

2. Este capítulo no abarca las medidas basadas en criterios de mercado, como derechos e impuestos, relativos a los motores de las aeronaves que afectan la calidad del aire local. Dichas medidas se tratan en el Doc 9884.

7.2.5 Las “Medidas económicas (basadas en criterios de Mercado)”<sup>1</sup> pueden comprender varios instrumentos diferentes para incorporar los costos externos ambientales de la actividad. Debe efectuarse una diferenciación básica en el marco de las políticas de la OACI entre impuestos que generan ingresos para uso gubernamental general, y derechos, destinados y aplicados a recuperar los costos del suministro de instalaciones y servicios para la aviación civil.<sup>2</sup> Las medidas económicas también pueden adoptar la forma de subsidios o prestaciones.

### Requisitos de las opciones de mitigación

7.2.6 Al examinar la aplicación de varias medidas de mitigación, se recomienda llevar cabo una evaluación de los posibles resultados positivos y negativos de la aplicación de esas medidas. La evaluación debería comprender lo siguiente:

- a) viabilidad técnica;
- b) razonabilidad económica;
- c) beneficios ambientales; y
- d) interdependencias posibles.

7.2.7 **Viabilidad técnica.** La tecnología prevista debería estar razonablemente disponible y ser lo suficientemente robusta como para utilizarse para la medida. Por consiguiente, la tecnología se desarrolla y puede haberse aplicado ya en otras partes. Se prevé que se necesiten pocas o ninguna actividad de investigación y desarrollo tecnológico.

7.2.8 **Razonabilidad económica.** Las decisiones sobre las medidas, o combinaciones de las mismas, deberían tener en cuenta una evaluación de la rentabilidad relativa de las opciones disponibles. Los costos debidos a la aplicación de las medidas escogidas deberían evaluarse y presupuestarse y deberían ser razonables en relación con las ventajas previstas. Si, por otra parte, las medidas presentan alguna posibilidad de obtener economías o incluso ingresos adicionales, este factor debería también evaluarse.

7.2.9 **Beneficios ambientales.** Los beneficios de la reducción de las emisiones deberían cuantificarse o, por lo menos, estimarse razonablemente con respecto a las diferentes especies y opciones. Deberían establecerse en relación con las emisiones aeroportuarias totales y su contribución a las emisiones en la zona geográfica pertinente en el marco de las leyes o reglamentos locales. Si el objetivo de las medidas es reducir o prevenir casos en que se rebasen las normas reglamentarias sobre calidad del aire, los beneficios deberán evaluarse en términos de dichas normas. La modelización de la calidad del aire, en particular los modelos de dispersión de concentraciones de contaminantes primarios (emitidos directamente) y secundarios, puede ser necesaria para evaluar la reducción de los casos en que se rebasan las normas prevista de los diferentes paquetes de medidas y permitir la comparación con las normas sobre calidad del aire ambiente. También, a efectos de evaluar cuáles de las fuentes de emisiones son los contribuyentes más importantes a cualquier rebase particular, puede ser necesario realizar cálculos de distribución proporcional de las fuentes con atribuciones temporales y espaciales empleando un modelo de dispersión apropiado.

7.2.10 **Posibles interdependencias.** Las medidas deberían evaluarse para establecer la existencia de posibles conflictos con otras prioridades ambientales, como la reducción del ruido, así como cualquier interrelación positiva que pueda ocurrir.

---

1. La categoría de medidas económicas no comprende las multas impuestas a los transgresores de requisitos normativos tradicionales.

2. *Políticas de la OACI sobre derechos aeroportuarios y por servicios de navegación aérea* (Doc 9082); Resolución A37-18 de la Asamblea, Apéndice H.

### Enfoque de planificación

7.2.11 Se recomienda adoptar un enfoque de gestión (planificar-hacer-verificar-actuar) según se detalla en los párrafos siguientes.

7.2.12 **Identificar el problema.** ¿Cuáles son las emisiones que deben reducirse y dónde está la fuente de las mismas? Aplicando el inventario de emisiones con las diversas fuentes y luego analizando las predicciones de concentraciones resultantes a partir de un modelo de dispersión, puede elaborarse un plan para tratar las fuentes de emisiones correctas.

7.2.13 **Definir los objetivos.** ¿Qué metas de reducción de emisiones deberían lograrse? Debe desarrollarse una comprensión de los requisitos normativos necesarios para el cumplimiento de las normas sobre calidad del aire local para ejecutar proyectos.

7.2.14 **Elaborar soluciones.** ¿Cuáles son las opciones disponibles para reducir las emisiones basándose en los problemas identificados y los objetivos determinados? Se requiere una minuciosa evaluación de las posibles estrategias de mitigación, sobre la base de los requisitos anteriores en materia de opciones de mitigación, a efectos de determinar la forma más apropiada de actuar para lograr los objetivos.

7.2.15 **Evaluar la rentabilidad de las opciones.** ¿Cuál es la rentabilidad relativa de la medida, o combinación de medidas, que se está considerando? ¿Cómo puede lograrse en la forma más rentable posible la reducción de las emisiones deseada?

7.2.16 **Examen por las partes interesadas.** ¿Resulta este plan aceptable a todas las partes interesadas? La creación de un equipo de examen por partes interesadas y el fomento de foros públicos de examen son fundamentales para el éxito del programa de mitigación.

7.2.17 **Aplicar las medidas.** ¿Qué sucede después de haberse aceptado el plan? En el plan, debería presentarse una reseña clara sobre cómo y cuándo se implantarán las opciones de mitigación, incluyendo lo que se espera de todas las partes interesadas, una serie de metas para ayudar al logro de todos los objetivos y un cronograma.

7.2.18 **Monitorear/examinar el programa.** ¿Satisface el programa las expectativas? Es fundamental para el éxito de un plan de mitigación establecer procedimientos de control incluyendo una métrica de actuación para vigilar el progreso hacia el resultado deseado, verificar el éxito y las ventajas, vigilar el rendimiento de los costos y también identificar carencias imprevistas. Los resultados de este examen podrían utilizarse luego para analizar el programa e incluir en el mismo la información obtenida.

7.2.19 El diseño y la elaboración de medidas son procedimientos que incluyen varias partes interesadas y no solamente una. Las diversas medidas deberían evaluarse y compararse antes de que se adopten decisiones y se activen medidas. Para preparar adecuadamente la documentación, varios ejemplos han demostrado la utilidad de una descripción estructurada de las medidas (véase la Tabla 7-2). En un plan de mitigación, las medidas pueden ordenarse según beneficios ecológicos, costos de implantación o cronogramas. Esto facilita el establecimiento de prioridades para la implantación real.

**Tabla 7-2. Descripción estructurada de las medidas**

Elemento	Contenido
Situación	Establece la base de referencia o el problema que ha de tratarse.
Metas	Describen la medida y las metas previstas.
Responsabilidades	Identifica quién es el responsable de la implantación (reglamentador, explotador aeroportuario, línea aérea, arrendatario).
Interfaces/socios	Describe los otros socios que están involucrados o que deban encararse.
Cumplimiento jurídico	Describe la base jurídica de la medida (si se requiere) o sugiere la iniciación de los cambios requeridos para lograr el cumplimiento.
Beneficios ambientales	Califica y cuantifica las emisiones o reducciones de concentraciones con la aplicación de esta medida.
Costos económicos	Cuantifica los costos relacionados con la implantación de la medida o combinación de medidas (inversiones y costos de explotación) en consideración y la eficacia relativa de las opciones disponibles, observando que también podrían haber economías de costos relacionados con la medida.
Interdependencias	Describe posibles compensaciones o interdependencias (especies de emisiones, especies de emisiones y emisiones, ruido) y proporciona opciones para mitigarlas.
Implantación	Proporciona algunas directrices limitadas sobre cómo implantar la medida.
Cronograma	Establece cronogramas o incluso plazos para la implantación.
Evaluación	Proporciona una evaluación de la medida y una recomendación para su implantación.

### 7.3 OPCIONES DE MITIGACIÓN

7.3.1 Las medidas de gestión de las emisiones aplicables a las fuentes en los aeropuertos pueden agruparse en cuatro amplias categorías, mientras que las fuentes de emisión también se agrupan en cuatro categorías principales. En la Tabla 7-1 se proporciona una matriz con las categorías de grupos de fuentes y de medidas y se proporcionan ejemplos sobre medidas posibles. Cabe señalar que las medidas enumeradas pueden no ser deseables o incluso aplicables en todos los casos y que existen muchas otras opciones posibles. Cabe señalar también que no todas las medidas corresponden al control del aeropuerto y se requiere cooperación con otras entidades.

7.3.2 Los ejemplos en la Tabla 7-1 no indican la eficacia de las medidas debido a que ésta variará de aeropuerto en aeropuerto, pero la tabla ilustra dónde pueden ubicarse en la estructura general.

7.3.3 La mejor forma de determinar las medidas seleccionadas para utilizar en un aeropuerto particular es basarse en consideraciones locales y en la cooperación con partes interesadas apropiadas en la explotación y uso del aeropuerto. Las mejores prácticas continuarán evolucionando y la autoridad aeroportuaria debería continuar evaluando las oportunidades y comprometer a las partes interesadas locales a que contribuyan en su justa medida a la reducción de las emisiones relacionadas con el aeropuerto.

-----



## Apéndice del Capítulo 7

### REFERENCIAS

Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI), 2009, *Manual de política y métodos recomendados de ACI*. En la Sección 6.2 de este manual se describen las emisiones y la calidad del aire local, y se ilustran posibles medidas para reducir las emisiones en la fuente.

OACI, 2018, *Manual de planificación de aeropuertos* (Doc. 9184), Parte II — *Utilización del terreno y gestión del medio ambiente*. En el Capítulo 3 del Doc 9184, Parte II, se reseñan las medidas de control de emisiones que los explotadores aeroportuarios pueden emplear, por sí solos o en cooperación con los explotadores de aeronaves, para aeronaves, vehículos de apoyo en tierra e instalaciones aeroportuarias.

OACI, 2014, *Oportunidades operacionales para reducir el consumo de combustible y las emisiones* (Doc 10013). El documento 10013 recopila las prácticas que pueden tener en cuenta todas las partes interesadas de la aviación para reducir el consumo de combustible y las emisiones resultantes. El documento reseña principios para el ahorro de combustible mediante la identificación de oportunidades y técnicas operacionales para reducir el uso de combustible, lo que a su vez reduce el volumen de emisiones de la aviación.



## Capítulo 8

# INTERRELACIONES VINCULADAS A LOS MÉTODOS PARA MITIGAR LOS IMPACTOS AMBIENTALES

### 8.1 INTRODUCCIÓN

8.1.1 Cuando se analizan los métodos para mitigar los impactos ambientales de la aviación, y de las operaciones de aeronaves en particular, es importante observar que pueden existir muchas interrelaciones entre los impactos ambientales y otros factores, como los efectos de la capacidad del espacio aéreo y de las pistas, el uso del espacio aéreo y la forma en que se le gestiona en distintos aeropuertos.

8.1.2 Aunque en el Capítulo 7 ya se analizan las opciones de mitigación para varias categorías de fuente diferentes, y existen interrelaciones para las fuentes ajenas a las aeronaves que afectan, por ejemplo, al ruido, al dióxido de carbono y gases de efecto invernadero, NO<sub>x</sub>, materia particulada y otras emisiones, estas interdependencias no se continúan analizando en este capítulo, que se concentra exclusivamente en las operaciones de aeronaves.

8.1.3 Además, debido a que este documento se ocupa de brindar orientación relativa a la calidad del aire local en los aeropuertos y a sus alrededores, en este capítulo no se tratan las interrelaciones que surgen de las fases de vuelo en ruta, sino que se concentra en las que afectan a las operaciones de aeronaves a altitudes inferiores [normalmente por debajo de 3 000 ft (914m)] en el “ciclo de vuelo LTO operacional” detallado en el Capítulo 2.

8.1.4 Obsérvese que el impacto del penacho de emisiones de una aeronave, a 3 000 ft, o por encima, respecto de las concentraciones de NO<sub>2</sub> a nivel de la superficie es muy pequeño aún en los análisis muy conservadores,<sup>1,2</sup> y la altitud de 1 000 ft es la altitud límite típica para las cuestiones de interés respecto del NO<sub>2</sub> a nivel de superficie.<sup>3</sup>

8.1.5 Las interrelaciones entre el ruido, las emisiones de NO<sub>x</sub> y las de consumo de combustible/CO<sub>2</sub> son a menudo complejas y pueden ser imprecisas y difíciles de comprender. Como resultado, exigen una cuidadosa evaluación para estimar los resultados de los cambios de las prácticas operacionales antes de tomarse decisiones operacionales o normativas. También puede haber interrelaciones entre los impactos ambientales y otros factores, como la capacidad del aeropuerto o del espacio aéreo, que deben determinarse antes de contemplar cambio alguno.

8.1.6 Algunas técnicas operacionales tienen el potencial de ofrecer mejoras en cuanto al ruido, consumo de combustible/CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, materia particulada y otras emisiones sin compensaciones importantes. Como ejemplo se tienen las operaciones en descenso continuo (CDO) en las que el ruido, las emisiones locales (con la posible excepción de emisiones de CO y HC) y las emisiones del consumo de combustible y CO<sub>2</sub> se reducen en mayor o menor grado,

- 
1. Roger L. Wayson, and Gregg G. Fleming, “Consideration of Air Quality Impacts by Aeroplane Operations at or above 3000 ft AGL,” FAA-AEE-00-01, DTS-34, Departamento de Transporte de los Estados Unidos, Administración Federal de Aviación, septiembre de 2000.
  2. U. Janicke, E. Fleuti, and I. Fuller. “LASPORT — A Model System for Airport-related Source Systems Based on a Lagrangian Particle Model,” *Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Cambridge, Reino Unido, 2007, <http://www.harmo.org/Conferences/Proceedings/Cambridge/publishedSections/Op352-356.pdf> (junio de 2020).
  3. OACI, *Efectos de los procedimientos PANS-OPS de salida para atenuación del ruido en el ruido y las emisiones gaseosas* (Cir 317), Organización de Aviación Civil Internacional, 2008.



aunque esto puede tener consecuencias sobre la capacidad en los aeropuertos de mucho movimiento dependiendo de la forma en que se gestione el espacio aéreo, la separación y otros factores. No obstante, la mayoría de las técnicas operacionales de mitigación exhiben interrelaciones y exigen compensaciones respecto de uno o más factores.

8.1.7 A medida que las presiones normativas y operacionales para reducir los impactos ambientales de las operaciones de aeronaves se hacen más intensas, las compensaciones que surgen de estas interrelaciones tienden a aparecer con más frecuencia y hacerse más difíciles de encarar.

## 8.2 RECOMENDACIONES PARA EVALUAR LAS INTERDEPENDENCIAS

8.2.1 La identificación y el cálculo de los impactos ambientales e interrelaciones pueden ser complejos y nada claros. A menudo exigen una complicada modelización de los efectos que sólo puede realizarse conjuntamente con datos de entrada proporcionados por los modelos sofisticados disponibles a los fabricantes de aeronaves y motores y otros grupos de expertos en esta materia.

8.2.2 Para poder definir correctamente los impactos ambientales, cuyas interdependencias están involucradas, deben realizarse en particular cálculos del consumo de combustible en un punto común a lo largo del perfil de vuelo. Esto es importante pues de otra forma podrían surgir diferencias que no son un fiel reflejo del caso general.

8.2.3 Respecto de las consecuencias sobre la calidad del aire local, las variaciones identificadas en los inventarios de emisiones no corresponden necesariamente con las diferencias en los impactos sobre la calidad del aire local porque la posición de la aeronave fuente en relación con el receptor es muy pertinente debido a la dispersión de las emisiones, así como las condiciones meteorológicas ambiente. Como resultado, una reducción general en el inventario de emisiones puede no siempre resultar en una reducción en los impactos sobre la calidad del aire local, lo que es especialmente cierto si toda la reducción tiene lugar en altitud.

8.2.4 El análisis de las interrelaciones del ruido es también un problema complejo, y la aplicación de técnicas diferentes puede resultar en diferencias en cuanto a la exposición acústica en diferentes puntos a lo largo de la trayectoria de vuelo o a los lados de ésta (a veces de signo diferente). Nótese que para las aeronaves de turbohélice o de hélice de otro tipo, los resultados pueden muy bien ser asimétricos debido a la dirección de rotación de las hélices y los impactos de este fenómeno requieren cuidadosa consideración cuando se analicen las compensaciones correspondientes a cualquier técnica de mitigación.

8.2.5 Los reglamentadores o cada explotador aeroportuario y de aeronaves pueden establecer decisiones de política. Es también importante estar al tanto de las restricciones jurídicas y otras políticas sobre el medio ambiente internacionales, nacionales y locales que puedan determinar el factor de control ambiental que ha de optimizarse a posibles expensas de otros aspectos.

8.2.6 Cabe señalar que, en los *Procedimientos para los Servicios de Navegación Aérea — Operación de aeronaves* (PANS-OPS, Doc 8168) de la OACI, se define el principio de que el explotador del avión no debería elaborar más de dos procedimientos de atenuación del ruido para cada tipo de avión. Se recomienda que un procedimiento proporcione beneficios acústicos para zonas cercanas al aeródromo y el otro para zonas más distantes del mismo. Este requisito también puede establecer una restricción sobre lo que puede lograrse.

8.2.7 Debido principalmente a las razones presentadas anteriormente resulta importante involucrar en el proceso de evaluación y tan pronto como sea posible, a todas las partes interesadas pertinentes: explotadores de aeronaves y aeropuertos, fabricantes de aeronaves y motores, aeropuertos, proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP), formuladores de políticas y reglamentadores.

8.2.8 En las secciones siguientes se identifican varios ejemplos de las interrelaciones que existen en las operaciones de tierra, fases de salida y llegada, respectivamente. No obstante, no se tiene la intención de que sean definitivos o completos, ni debería considerarse como que favorecen una opción de mitigación determinada. Sin embargo, estos ejemplos están

dirigidos a proporcionar una guía práctica de los tipos de interrelaciones que existen para ciertos métodos y deberían considerarse como un subconjunto de todos los que existen en las operaciones cotidianas reales.

### 8.3 INTERRELACIONES OPERACIONALES PARA OPERACIONES EN TIERRA

8.3.1 Se dispone de varias prácticas diferentes para uso durante operaciones en tierra, aunque si se siguen algunas de las prácticas descritas, puede haber ciertas interrelaciones complejas y efectos imprevistos sobre otras partes del ciclo de vuelo. Aunque los riesgos para la seguridad operacional de utilizar diferentes técnicas son menores en la superficie que en el aire, por razones de seguridad, la pérdida de sistemas o las consecuencias de los FOD o chorros de reactores pueden limitar las posibilidades. Los impactos operacionales no relacionados con el medio ambiente sobre los tiempos de escala más breves y la capacidad en algunos aeropuertos para ciertos tipos de operaciones pueden verse más afectados por las diferentes técnicas que por las diferencias en los procedimientos en vuelo.

8.3.2 En la Tabla 8-1 se muestran unos ejemplos de las consecuencias de las distintas técnicas o procedimientos para las operaciones en tierra y su impacto ambiental sobre el ruido, combustible/CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (LAQ). Otras especies de emisiones, como materia particulada, CO y HC, pueden añadirse en fecha posterior cuando se disponga de más información.

**Tabla 8-1. Interrelaciones ambientales para las operaciones en tierra**

Técnica	Ruido	Impacto ambiental sobre:		Comentarios
		Combustible/CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> (LAQ)	
Uso de fuentes fijas de electricidad y aire acondicionado, en APU	Ruido en la rampa reducido. Ruido en tierra reducido	Reducido	Reducido	Posibles impactos adversos en los tiempos de escala breves, especialmente cuando se emplea PCA.
Rodaje de llegada con menos de todos los motores en funcionamiento	Potencialmente reducido, aunque puede enmascararse por el aumento de potencia de los restantes motores en funcionamiento	Reducido, aunque se verá afectado por cualquier aumento de potencia en los motores en funcionamiento	Reducido, aunque se verá afectado por cualquier aumento de potencia en los motores en funcionamiento	Deben tratarse varios problemas de seguridad operacional antes de esta maniobra. Puede haber requisitos operacionales de que el APU deba estar funcionando lo que reducirá los beneficios, y puede haber también otras consideraciones operacionales.
Rodaje de salida con menos de todos los motores en funcionamiento	Posiblemente reducido, aunque puede enmascararse por el aumento de potencia de los restantes motores en funcionamiento	Reducido, aunque se verá afectado por cualquier aumento de potencia en los motores en funcionamiento	Reducido, aunque se verá afectado por cualquier aumento de potencia en los motores en funcionamiento	Deberán tratarse un mayor número de preocupaciones de seguridad operacional antes de esta maniobra. Puede haber requisitos operacionales de que el APU debe estar en funcionamiento lo que reducirá los beneficios, y puede haber también mayores restricciones de seguridad y operacionales para esta práctica que para el rodaje de llegada.
Remolque de aeronave	Reducido	Reducido	Posiblemente reducido, pero depende de la norma tecnológica del remolcador	La congestión de las calles de rodaje puede ser un gran problema en algunos aeropuertos. También algunas aeronaves pueden no satisfacer los requisitos de resistencia del montante de la rueda de proa. Se reducirán casos de FOD. La cobertura antifuego en las áreas de arranque puede ser problemática y para algunas aeronaves habrá que disponer de remolcadores especiales.
Espera en tierra	Aumentado (Nota)	Aumentado (Nota)	Aumentado (Nota)	Se requiere a veces para asegurar el uso eficiente de la pista cuando proporciona el factor límite de la capacidad, entonces una espera en tierra reducida puede tener consecuencias sobre la capacidad.

*Nota.— Aunque el ruido, las emisiones del consumo de combustible/CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> aumentarán con respecto a cuando no hay esperas, serán inferiores que la alternativa de hacer la espera en el aire — véase 8.5.6.*

### Uso de grupos auxiliares de energía

8.3.3 Normalmente, resulta beneficioso restringir el uso de los APU en las aeronaves si se dispone de fuentes de suministro de alternativa en la puerta/puesto de estacionamiento. No obstante, por razones de seguridad operacional, algunas de las alternativas indicadas en la Tabla 8-1 exigen que el APU alimente, o proporciona la necesaria reserva redundante, a ciertos sistemas para permitir la aplicación de la técnica descrita. Si esta técnica se aplica, inevitablemente tendrá un impacto (aumento) en el uso del APU en la puerta y, por consiguiente, los impactos ambientales de algunas de estas interrelaciones están conectados entre sí. En este caso, los aspectos a favor y en contra de todo el ciclo operacional deben analizarse cuidadosamente para identificar la mejor práctica para reducir los impactos ambientales del ciclo total. Cabe señalar que esto puede resultar en diferentes prácticas para diferentes tipos de aeronaves en diferentes aeródromos.

## 8.4 INTERRELACIONES OPERACIONALES PARA LAS SALIDAS

8.4.1 La fase de despegue puede ser compleja, con varios tramos que involucran cambios de velocidad, configuración de aeronave y reglaje de potencia de motores. También hay varios parámetros que pueden modificarse para alterar las consecuencias del ruido, el consumo de combustible y las emisiones y, también, tienen un impacto sobre los costos de mantenimiento y el uso del espacio aéreo, todo lo cual contribuye a la complejidad de esta fase.

8.4.2 En la Tabla 8-2 se proporcionan algunos ejemplos de los efectos de las técnicas y procedimientos de despegue y ascenso y su impacto ambiental respecto del ruido, combustible/CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (LAQ).

### Importancia del peso de despegue limitado por la performance (PLTOW)

8.4.3 El peso de despegue limitado por la performance (PLTOW) para cualquier operación particular es el peso máximo que puede utilizarse para las condiciones prevalecientes en el momento, limitado solamente por las longitudes de pista declaradas y las consideraciones de requisitos de ascenso, es decir, ignorando cualquier limitación relativa a los pesos estructurales certificados, incluidos el peso máximo de despegue (MTOW) y el peso máximo de aterrizaje (MLW).

8.4.4 La mayoría de las técnicas operacionales que afectan la configuración de despegue de la aeronave tienen consecuencias sobre el PLTOW para cualquier pista y condición meteorológica particulares. Los cambios de cualquiera de las características de la longitud de la pista empleada; por ejemplo, seleccionando un punto de arranque intermedio para el despegue o reducciones de las distancias declaradas debido a obras en curso, también pueden tener consecuencias sobre el PLTOW.

8.4.5 El PLTOW es un parámetro importante para evaluar el impacto de las emisiones de NO<sub>x</sub> debido a que la diferencia entre el peso real de despegue de la aeronave y el PLTOW determina en gran medida la cantidad máxima de reducción de empuje disponible para utilizar durante el despegue. Esto se debe en gran parte a la relación entre las emisiones de NO<sub>x</sub> y la potencia de despegue real utilizada, afectando el volumen de NO<sub>x</sub> emitido (aumentos en la potencia pueden resultar en una producción de NO<sub>x</sub> considerablemente mayor). No obstante, cabe señalar que esto no es necesariamente cierto para las emisiones de CO y HC en las que potencias más bajas pueden tener un impacto levemente negativo.

8.4.6 Por otra parte, aunque los impactos sobre el ruido son complejos y los incrementos de potencia aumentarán los niveles de ruido para el recorrido en tierra y cerca del aeropuerto, una vez en vuelo, los efectos de la mayor distancia por encima de la pista debidos a la mayor pendiente de ascenso compensarán normalmente los aumentos del ruido en la fuente, y en general los niveles de ruido por debajo de la trayectoria de vuelo se ven reducidos. No obstante, pueden aumentar los efectos en las áreas de huella de ruido debido a que las características de atenuación lateral de una fuente de ruido en ascenso son menos afectadas por la proximidad del suelo.<sup>4</sup>

---

4. OACI, *Métodos recomendados para calcular las curvas de nivel de ruido en las proximidades de los aeropuertos* (Doc 9911), Organización de Aviación Civil Internacional, 2018.

**Tabla 8-2. Impactos ambientales de las diferentes técnicas de salida**

Técnica	Impacto ambiental sobre:			Comentarios
	Ruido	Combustible/CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> (LAQ)	
Aumento de potencia de despegue	Se reduce el ruido bajo la trayectoria de vuelo, pero puede aumentar la huella acústica	Ligeramente reducido o aumentado (Nota 1)	NO <sub>x</sub> aumenta con reglaje de potencia	Impacto adverso en los costos de mantenimiento de motores (Nota 2).
Reglaje de flaps de despegue reducido	Ruido reducido si mejora la relación sustentación a resistencia — dependiendo de características de la aeronave y de la pista	Puede reducirse ligeramente	Puede aumentar o disminuir (Nota 3)	Posibles casos de golpe de cola para algunos tipos en ciertas condiciones (Nota 4).
Reducción de altitud de aceleración	El ruido aumenta después del punto de altitud de aceleración, pero puede reducirse más adelante	Reducido	Poca o ninguna diferencia (Nota 5)	Las diferencias actuales dependen de la diferencia en la altitud de aceleración seleccionada respecto de la práctica normal de la línea aérea (Nota 4).
Demora de la altitud de retracción de flaps en el ascenso	El ruido se reduce más cerca del aeropuerto, pero aumenta más allá	Aumentado	Poca o ninguna diferencia (Nota 5)	(Nota 4)
Aumento de la altitud de reducción de empuje	El ruido aumenta a algunas distancias cerca del aeropuerto, pero se reduce más allá	Ligero aumento o reducción dependiendo del plan de retracción de flaps	Poca o ninguna diferencia (Nota 5)	(Nota 4)
Secuencias de tramos de aceleración de ascenso (reducción de potencia, retracción de flaps, luego acelerar)	Se reduce el ruido bajo la trayectoria de vuelo después del punto de aceleración normal	Aumenta	Poca o ninguna diferencia (Nota 5)	Las aeronaves que vuelan en configuración de mucha resistencia con baja potencia pueden preocupar a los reglamentadores de la seguridad (Nota 4).
Aumentar velocidades (VR, V2 y velocidades de ascenso)	El ruido aumenta ligeramente cerca del aeropuerto pero se reduce más allá	Poca diferencia — levemente aumentado	Puede aumentar o disminuir (Nota 3)	No se aplica a algunos tipos de aeronave y a algunos explotadores dependiendo de las técnicas de despegue normales. También depende de las limitaciones de performance de despegue (Nota 4).
Aumento del reglaje de potencia de ascenso	El ruido aumenta después de la reducción más cerca del aeropuerto pero disminuye más allá	Poca diferencia — levemente reducido	Poca o ninguna diferencia (Nota 5)	Consecuencias adversas sobre los costos de mantenimiento de los motores (Nota 4).
Nuevo sistema de gestión de potencia (por ejemplo, "ruido gestionado" FMS)	Reducido en puntos específicos identificados como sensibles al ruido	Depende del procedimiento, la aeronave, el receptor de ruido y las características del aeropuerto	Poca o ninguna diferencia (Nota 5)	Actualmente sólo es posible con FMS de nueva generación, de nuevos tipos de aeronave, Por ejemplo, A380, B787, A350.
Rutas preferenciales en relación con el ruido (NPR)	Impacto reducido en las poblaciones cercanas al aeropuerto	Normalmente aumenta debido a kilómetros de derrota adicionales volados y requisitos de viraje a baja altura	Pequeño aumento dependiendo del diseño del NPR (Nota 5)	Las NPR se diseñan para evitar áreas muy densamente pobladas, de modo que las poblaciones afectadas por el ruido sean menores, no obstante el ruido total emitido puede ser mayor.
Uso de pistas de ruido mínimo	Impacto reducido en las poblaciones cercanas al aeropuerto	Aumento o disminución dependiendo del diseño de cada aeropuerto y circunstancias locales	Aumento o disminución dependiendo del diseño de cada aeropuerto y circunstancias locales	El uso de pistas de ruido mínimo se diseñan para evitar áreas muy densamente pobladas, de modo que las poblaciones afectadas por el ruido sean menores. No obstante el ruido total emitido puede ser mayor.

Notas. —

1. Aunque el flujo de combustible es mayor al mayor reglaje de potencia, el tiempo en el mismo se reducirá lo que resulta en leves diferencias que pueden ser positivas o negativas y no serán iguales para todas las emisiones.
2. Limitaciones jurídicas actuales impiden aplicar procedimientos de salida para atenuación del ruido (NADP) por debajo de 800 ft AAL (OACI 2006).
3. El PLTOW (véase 8.4.3 a 8.4.7) se verá afectado, lo que a su vez influirá en el reglaje del empuje de despegue y emisiones NO<sub>x</sub> producidas.
4. Tendrá consecuencias en la trayectoria de vuelo y velocidades, de modo que el ATC deberá conocer las implicaciones de estos procedimientos para asegurar una gestión segura y eficiente de la afluencia. Pueden también tener impactos en el cumplimiento de NPR con requisitos de viraje a baja altura.
5. Las diferencias de las emisiones por encima de 1 000 ft AGL tendrán pocas consecuencias en los cambios de las concentraciones a nivel de superficie.

8.4.7 Los efectos sobre las emisiones del consumo de combustible y las de dióxido de carbono serán leves y pueden ser positivos o negativos dependiendo de las circunstancias individuales y del tipo de aeronave en consideración. Como resultado, deberán evaluarse para cada circunstancia individual.

## 8.5 INTERRELACIONES OPERACIONALES PARA LAS LLEGADAS

8.5.1 A diferencia de las salidas, la mayoría de las técnicas de llegada entrañan ninguna o muy pocas compensaciones entre diferentes impactos ambientales. No obstante, puede haber impactos sobre otros parámetros no relacionados con el medio ambiente, especialmente cuando se considera la forma en que se gestiona el espacio aéreo. Además, éstos pueden exigir una instalación de equipo específico o ayudas para la navegación a efectos de facilitar la trayectoria de vuelo de descenso y aproximación, y también pueden ser objeto de políticas normativas específicas que pueden hacer más lenta su adopción.

8.5.2 En la Tabla 8-3 se proporcionan algunos ejemplos de los efectos de diferentes procedimientos y técnicas de llegada y su impacto ambiental en el ruido, combustible/CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (LAQ).

**Tabla 8-3. Impactos ambientales de diferentes técnicas de aproximación**

Técnica	Impacto ambiental sobre:			Comentarios
	Ruido	Combustible/CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> (LAQ)	
Operaciones en descenso continuo (CDO) <sup>5</sup>	Reducciones antes de ingresar a la pendiente de planeo ILS	Reducido	Poca o ninguna diferencia (Nota 1)	Los procedimientos deben convenirse y establecerse primero. El mayor beneficio será cuando se inician a mayores altitudes con equipo de navegación más avanzado. Puede afectar la capacidad (Nota 2).
Llegadas adaptadas	Reducciones antes de ingresar a la pendiente de planeo ILS	Reducido	Poca o ninguna diferencia (Nota 1)	Similar a las CDO, pero adaptadas a un vuelo específico mediante la integración de todas las limitaciones conocidas de la performance de la aeronave, el tránsito aéreo, el espacio aéreo, meteorológicas, franqueamiento de obstáculos y ambientales que se espera encontrar durante la llegada.
Baja potencia/poca resistencia (LP/LD)	Reducciones más cerca del umbral de pista	Reducido (Nota 3)	Leve reducción (Nota 3)	Los criterios de aproximación estabilizada de la OACI pueden restringir algunos tipos en algunos aeródromos. Puede afectar los regímenes de afluencia con diferentes requisitos de velocidad de aeronaves (Nota 2, Nota 4).
Aproximación en curva	Impacto reducido en las poblaciones cercanas al aeropuerto, no obstante el ruido total emitido puede ser mayor	Puede aumentar dependiendo de la diferencia de kilómetros de derrota	Poca o ninguna diferencia (Nota 1)	Los procedimientos deben convenirse y establecerse primero. Puede requerirse equipo de navegación más avanzado para ayudar en el control de trayectoria de vuelo (Nota 4).
Punto de toma de contacto desplazado	Reducido — mayores reducciones cerca de los límites del aeropuerto	Sin diferencia (Nota 3)	Reducciones para zonas afectadas fuera del aeropuerto (Nota 3)	Las aplicaciones también pueden verse limitadas por las características locales de resistencia de la pista (Nota 2, Nota 4).

Notas. —

1. Las diferencias para las emisiones por encima de 1 000 ft AGL tendrán pocas consecuencias en los cambios de concentraciones a nivel de superficie.
2. Consideraciones de seguridad operacional pueden impedir las reducciones de reglajes de flaps si la pista es corta, está húmeda o contaminada.
3. La mayor aplicación de la inversión del empuje como resultado de esta técnica puede afectar las mejoras que resulten de la misma.
4. Puede exigir aeronaves especialmente modificadas y cambios o adiciones al equipo terrestre.

5. EUROCONTROL, *Continuous Descent Approach — Implementation Guidance Information*, EUROCONTROL, mayo de 2008.

### Consideraciones sobre la inversión del empuje

8.5.3 En general, la inversión del empuje no se requiere para operaciones normales a pistas secas, aunque disponer de esa posibilidad es una precaución prudente de seguridad operacional. Como resultado, al aterrizaje, casi universalmente se selecciona una inversión de marcha lenta cuando consideraciones de performance o de otro tipo (por ejemplo, estado de la superficie de la pista) no imponen reglajes de potencia inversa más elevados. Varias técnicas de llegada pueden resultar en un requisito operacional aumentado de inversión del empuje, incluyendo el aumento de la capacidad de la pista mediante reducción del tiempo de ocupación de la misma.

8.5.4 Normalmente es posible utilizar una mayor potencia de frenado en vez de la inversión del empuje, y esto permite reducir el ruido y las emisiones de los motores (aunque las emisiones de PM pueden aumentar) y en menores costos del consumo de combustible. No obstante, los costos del mayor desgaste de frenos y neumáticos relacionados con esta técnica deberán tenerse en cuenta.<sup>6</sup> Además, aunque no es el centro de atención de este documento, el desgaste de frenos y neumáticos puede crear considerables concentraciones locales de partículas cuando se las compara con los motores de las aeronaves, y estas concentraciones deberían tenerse en cuenta al analizar los impactos sobre la calidad del aire local en las operaciones de aeronaves cuando se propone un mayor uso del frenado.

### Una observación sobre las esperas

8.5.5 En los aeropuertos pueden requerirse esperas por varias razones, por ejemplo, para asegurar el uso eficiente de la pista cuando ello proporciona un factor de limitación de la capacidad. En este caso, la espera en vuelo se requiere para proporcionar un “depósito” de aeronaves que alimente la corriente de llegadas, y la espera en tierra asegura que siempre se maximice el régimen de afluencia de salidas.

8.5.6 Para pistas únicas, u operaciones en modos mixtos, puede haber un conflicto entre las aeronaves que esperan para despegar y las que se encuentran en vuelo esperando aterrizar, especialmente en horas del día de mucho movimiento o cuando el aeropuerto está funcionando al límite de su capacidad, o cerca del mismo. En este caso, aunque siempre es beneficioso reducir los tiempos de espera en la medida posible, cuando la espera es inevitable, entonces deberán aplicarse claras compensaciones:

- a) la espera en tierra minimiza el ruido de espera y las emisiones del consumo de combustible/CO<sub>2</sub> y, por esa razón, siempre es mucho mejor que las salidas esperen en tierra y se liberen las esperas de llegada. No obstante, ello maximiza el impacto en la calidad del aire local;
- b) la espera en vuelo no afecta realmente la calidad del aire a nivel de superficie porque se lleva a cabo a altitudes muy por encima de 1 000 ft, a la que los impactos sobre la calidad del aire local serán mínimos, en caso de haberlos, pero los impactos sobre el ruido de espera y las emisiones del consumo de combustible/CO<sub>2</sub> aumentarán enormemente.

## 8.6 EJEMPLOS ESPECÍFICOS — CIRCULAR 317 DE LA OACI

8.6.1 En esta sección figuran algunos ejemplos de análisis realizados por miembros del WG2 del CAEP de la OACI, utilizando varios tipos diferentes de aeronaves para un aeropuerto sin restricciones y no específico. Se han evaluado los cambios para:

- a) emisiones de NO<sub>x</sub> a 1 000 ft y 3 000 ft;

---

6. OACI, *Oportunidades operacionales para reducir el consumo de combustible y las emisiones* (Doc 10013), Organización de Aviación Civil Internacional, 2014.

- b) CO<sub>2</sub> total (y por consiguiente consumo de combustible) hasta un punto común después de la cima del ascenso (el consumo de combustible hasta 3 000 ft varía con el tipo y la distancia de sector, pero también varía entre un 2,5% (para vuelos de muy larga distancia) hasta un 25% (para vuelos muy breves del combustible total para el sector);
- c) diferencia máxima del ruido cercano y diferencia máxima del ruido lejano a lo largo del punto de cruce (distancia a partir de la liberación de frenos), donde cambia de signo la diferencia de ruido; y
- d) número de procedimientos para ocho tipos diferentes de aeronave.

8.6.2 Esta información se brinda solamente para proporcionar una guía de los tipos de interrelaciones que pueden encontrarse en las operaciones reales y no debe considerarse como representativa de todas las aeronaves, incluso el mismo tipo, en todos los aeropuertos.

8.6.3 En la Circular 317 se han publicado los detalles completos de los resultados de este estudio, aunque aquí se brindan resúmenes de las interrelaciones ambientales para tres técnicas a efectos de ilustrar el tipo de compensación que pueda requerirse.

8.6.4 En las Figuras 8-1 a 8-6 se presentan los impactos de tres diferentes cambios operacionales en ocho tipos de aeronave. El número de identificación de aeronave utilizado en las figuras es el presentado en la Tabla 8-4.

#### **Efecto de la altura de reducción del empuje**

8.6.5 El efecto de la altura de reducción del empuje puede verse en los resultados del análisis de la comparación de una reducción del empuje desde potencia de despegue hasta el empuje máximo de ascenso (MCLT) a 1 500 ft con respecto a una reducción del empuje iniciada a 800 ft.

8.6.6 Los resultados indican que las emisiones de NO<sub>x</sub> a baja altura aumentan en general, mientras que el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen ligeramente. El ruido cercano también aumenta mientras que el ruido lejano se reduce a una cantidad inferior después del punto de cruce que está relativamente cerca del aeropuerto. Véanse las Figuras 8-1 a 8-2.

#### **Efecto de la secuencia de reducción del empuje**

8.6.7 Los efectos de diferentes secuencias de reducción del empuje se ilustran en las Figuras 8-3 y 8-4, donde el procedimiento básico consiste en iniciar la aceleración y la retracción de flaps a 800 ft, seguidas de una reducción de empuje al MCLT cuando se ha completado la retracción de flaps. El procedimiento alternativo entraña una reducción de empuje al MCLT a 800 ft antes de iniciarse la aceleración y la retracción de flaps.

8.6.8 Los resultados indican que, en general, las emisiones de NO<sub>x</sub> se reducen, con un ligero aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> (inferior al 1%). El ruido cercano se reduce mientras que el ruido lejano aumenta después de un punto de cruce que, nuevamente, queda relativamente cercano al aeropuerto.

#### **Altura de retracción de flaps**

8.6.9 El efecto de altura de retracción de flaps se ilustra en las Figuras 8-5 y 8-6, donde el procedimiento básico es la reducción de empuje al MCLT a 800 ft, pero postergando la iniciación de aceleración y retracción de flaps hasta 3 000 ft. La alternativa es reducir el empuje al MCLT e iniciar la aceleración y la retracción de flaps a 800 ft.

8.6.10 Los resultados indican que, en general, las emisiones de NO<sub>x</sub> aumentan considerablemente, con una ligera reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El ruido cercano aumenta mientras que el ruido lejano disminuye después de un punto de cruce ubicado relativamente lejos del aeropuerto.

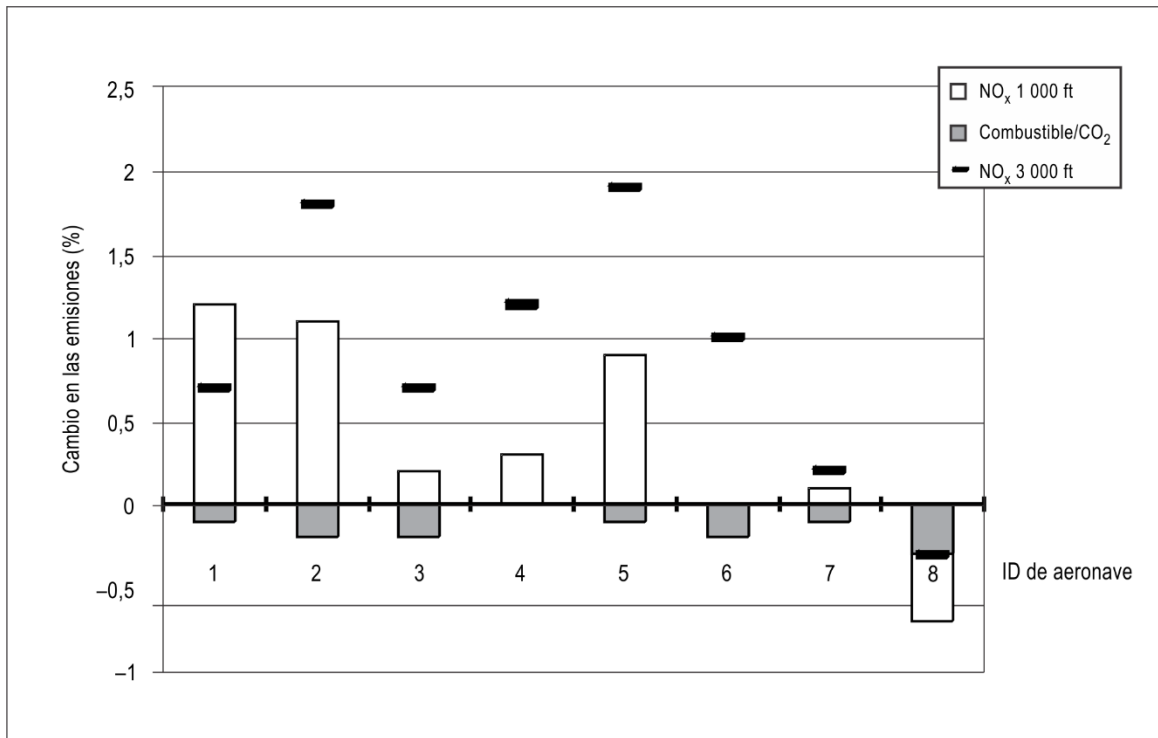


Figura 8-1. Impactos sobre las emisiones de las diferentes alturas de reducción de empuje

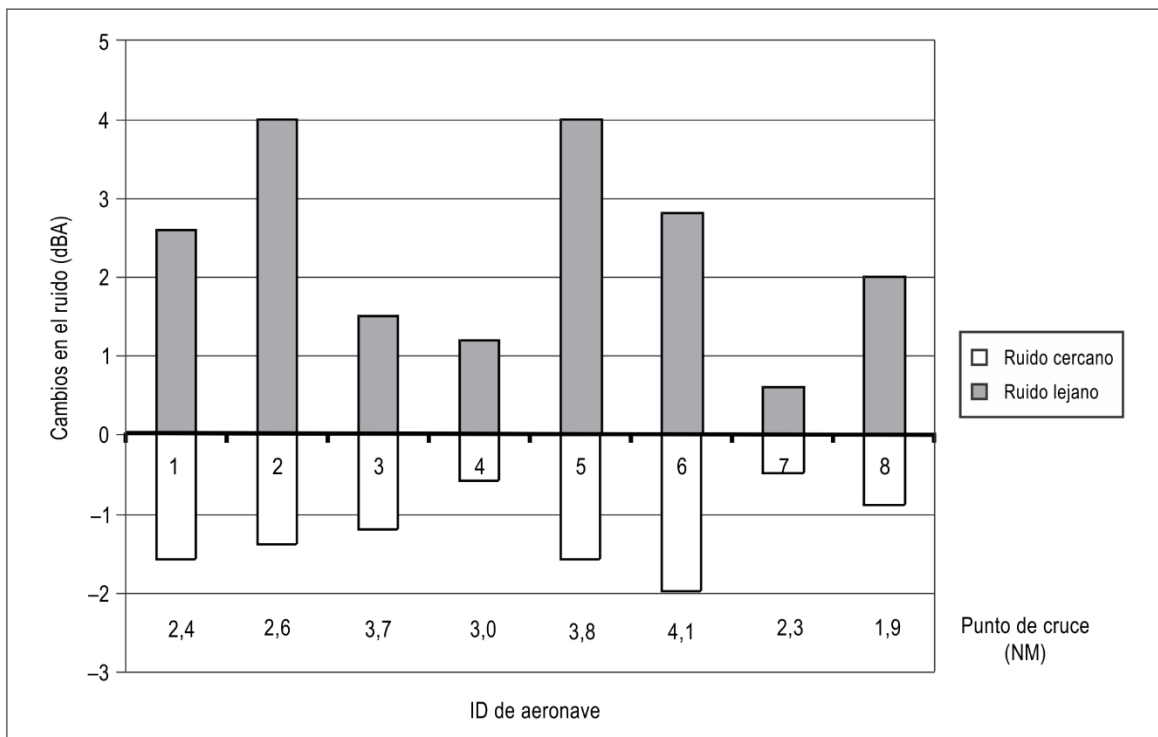


Figura 8-2. Impacto sobre el ruido de las diferentes alturas de reducción de empuje



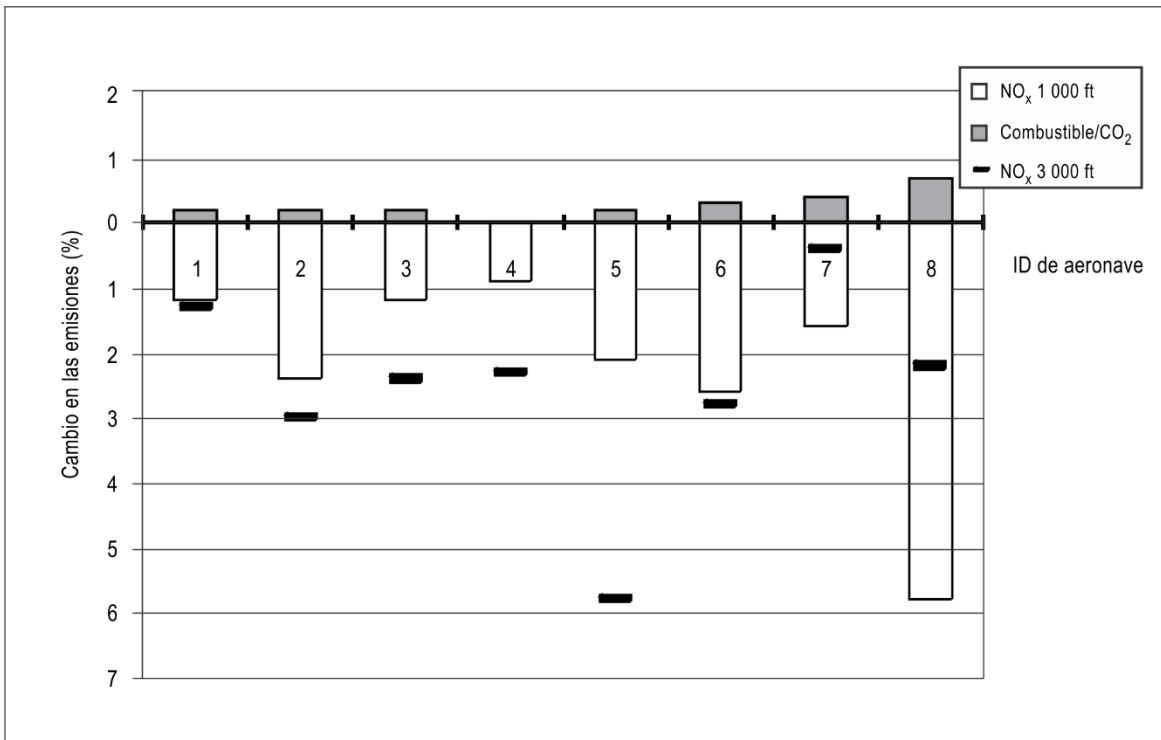


Figura 8-3. Impacto sobre las emisiones de las diferentes secuencias de reducción de empuje

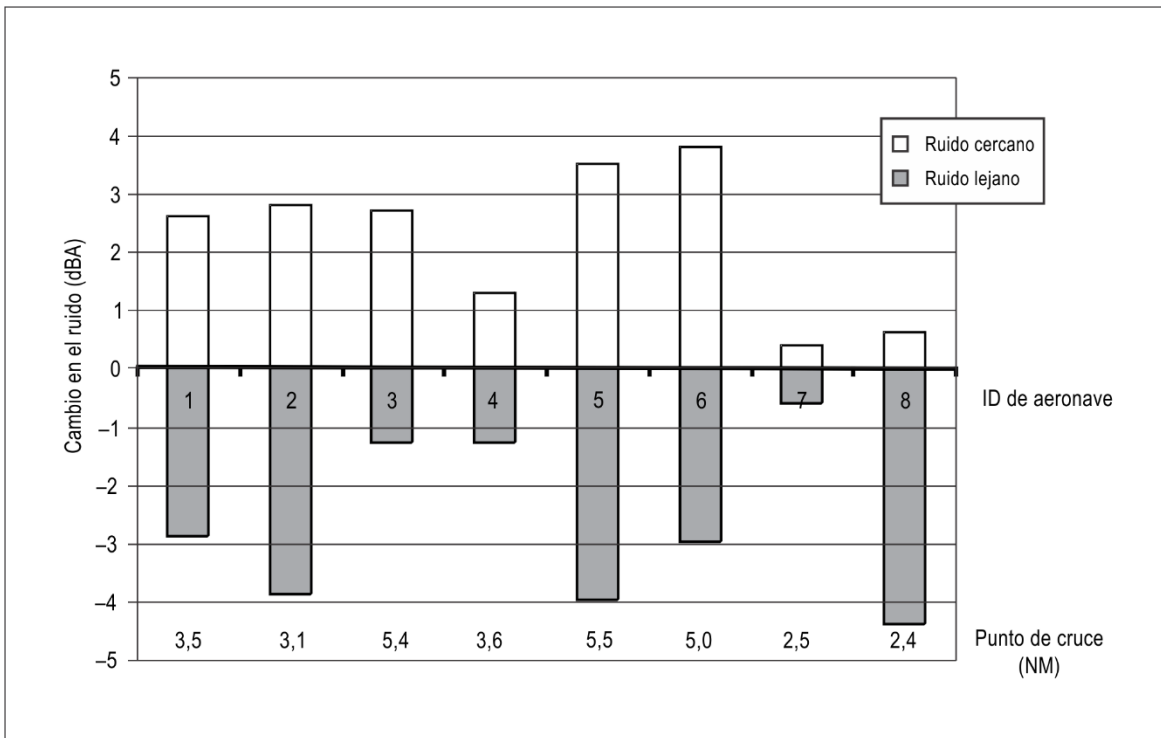


Figura 8-4. Impactos sobre el ruido de las diferentes secuencias de reducción de empuje

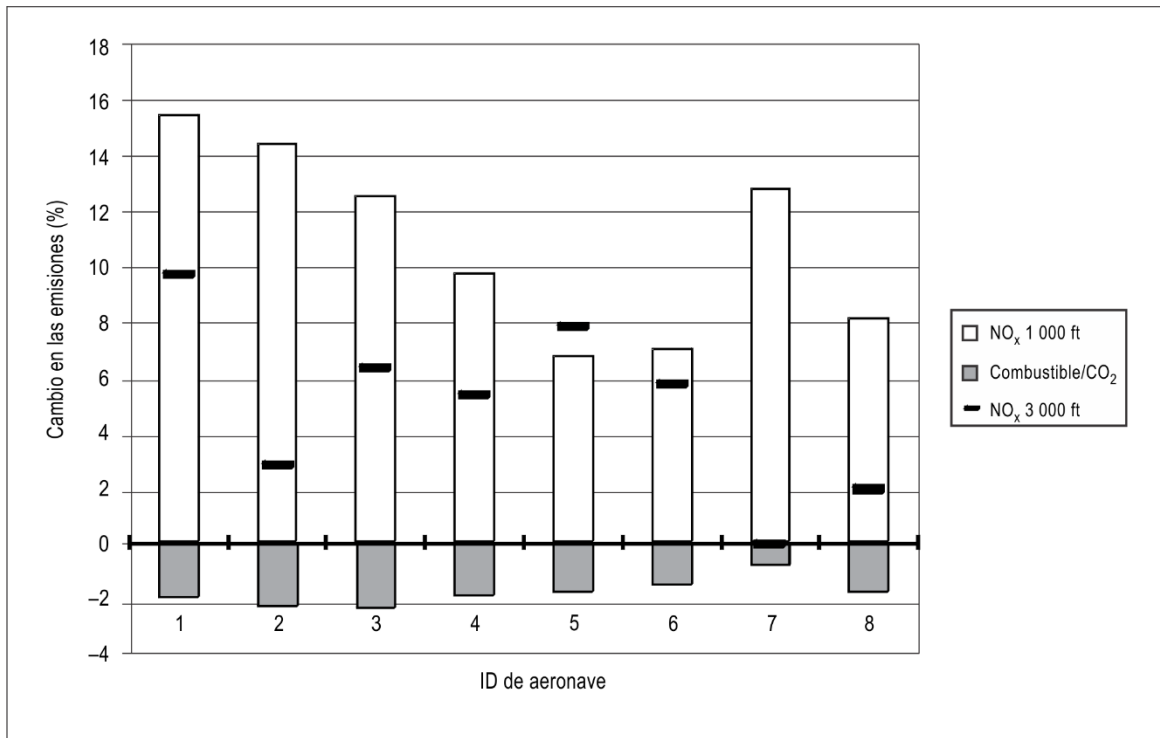


Figura 8-5. Impactos sobre las emisiones de las diferentes alturas de retracción de flaps

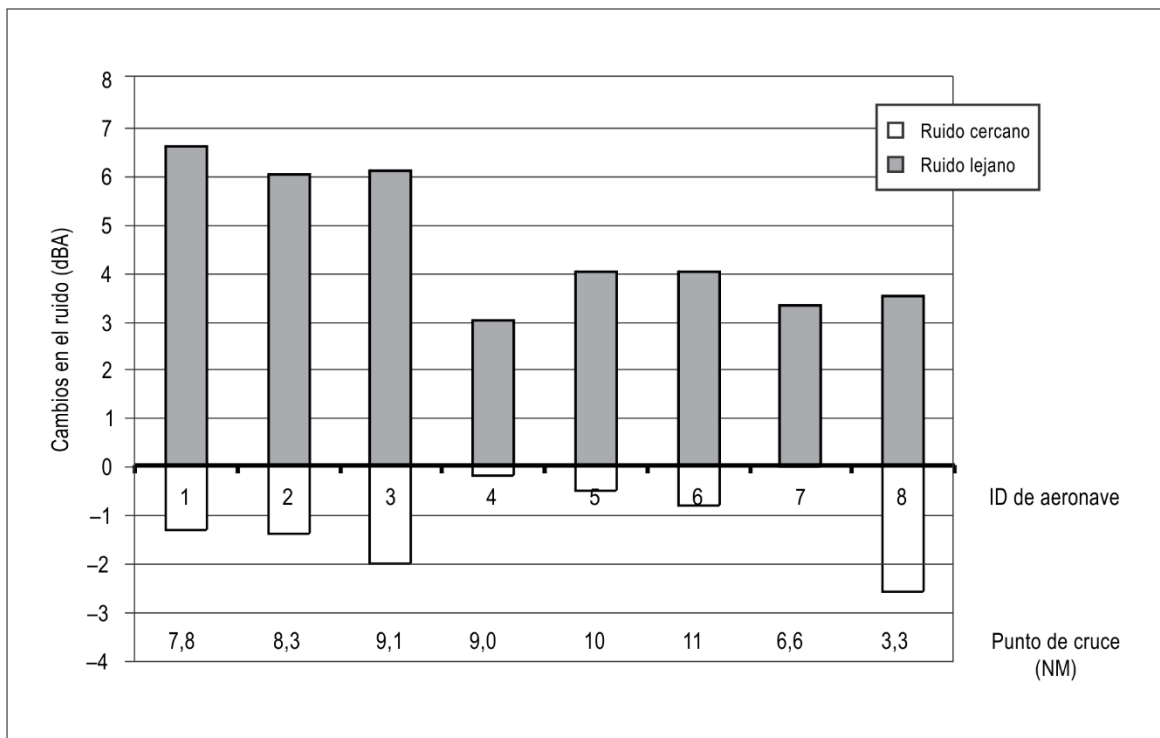


Figura 8-6. Impactos sobre el ruido de las diferentes alturas de retracción de flaps

**Tabla 8-4. Tipos de aeronaves utilizados en el estudio de la Circular 317**  
**(ID es el número de identificación de aeronave utilizado en las Figuras 8-1 a 8-6)**

ID	Tipo de aeronave
1.	Airbus A320-214, CFM56-5B4/P Peso de despegue 77 000 kg Empuje de despegue reducido de 12%
2.	Boeing 737-700, CFM56-7B24 Peso de despegue 70 000 kg Empuje de despegue reducido de 10%
3.	Airbus A330-223, PW4168A Peso de despegue 233 000 kg Empuje de despegue reducido de 12%
4.	Airbus A340-642, Trent 556 Peso de despegue 368 000 kg Empuje de despegue reducido de 12%
5.	Boeing 767-400, CF6-80C2B8F Peso de despegue 204 000 kg Empuje de despegue reducido de 10%
6.	Boeing 777-300, Trent 892 Peso de despegue 300 000 kg Empuje de despegue reducido de 10%
7.	Bombardier CRJ900ER, CF4-8C5 Peso de despegue 37 000 kg Empuje de despegue reducido de 10%
8.	Dassault Falcon 2000EX, PW308C Peso de despegue 19 000 kg Empuje de despegue máximo

## REFERENCIAS

- Administración Federal de Aviación, Oficina de Medio Ambiente y Energía, *Aviation Emissions and Air Quality Handbook*, Versión 3, Actualización 1, FAA-AEE-2014-12, 2015, [http://www.faa.gov/regulations\\_policies/policy\\_guidance/envir\\_policy/airquality\\_handbook/media/Air\\_Quality\\_Handbook\\_Appendices.pdf](http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/airquality_handbook/media/Air_Quality_Handbook_Appendices.pdf) (junio de 2020).
- Administración Federal de Aviación, Oficina de Medio Ambiente y Energía, *Emissions and Dispersion Modelling System (EDMS) User's Manual*, FAA-AEE-07-01 (Rev. 10 – 06/07/13), June 2013, [http://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/apl/research/models/edms\\_model/media/EDMS\\_5.1.4\\_User\\_Manual.pdf](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/edms_model/media/EDMS_5.1.4_User_Manual.pdf) (junio de 2020).
- Administración Federal de Aviación, Oficina de Políticas y Planes de Aviación, *Official Airline Guide*, [www.faa.gov](http://www.faa.gov) (junio de 2020).
- Administración Federal de Aviación, Oficina de Políticas y Planes de Aviación, *Terminal Area Forecast (TAF)*, <https://aspm.faa.gov/main/taf.asp> (junio de 2020).
- Administración Federal de Aviación, Olmstead, Jeffery R., *Integrated Noise Model (INM) Technical Manual, Version 6.0*. enero de 2002 FAA-AEE-08-01, [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/apl/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/) (junio de 2020).
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, *Modelling and Inventories, NONROAD*, <http://www.epa.gov/otaq/nonrdmdl.htm> (junio de 2020).
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina del aire y radiaciones, *Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures*, 1992.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina del aire y radiaciones, Vida media, *Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modelling*; 2004.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina del aire y radiaciones, *Nonroad Engine and Vehicle Emission Study —Report*, 1991.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina del aire y radiaciones, *User's Guide for the Nonroad Emissions Model Draft NONROAD 2002*, 2002.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina de planificación y normas sobre calidad del aire, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources (AP-42)*, Fifth Edition and Supplements, 1995 (con Suplementos hasta 2004).
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina de planificación y normas sobre calidad del aire, *Procedures for Emission Inventory Preparation*, Volume IV: Mobile Sources, 1992.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina de planificación y normas sobre calidad del aire, *User's Guide to Tanks, Storage Tank Emissions Calculation Software*, Version 4.0, 1999.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Oficina de investigación y desarrollo, Informe final — *Evaluation of Emissions from Paving Asphalts*, 1994.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, *Spatial Allocation*,

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, *Technical Support for Development of Airport Ground Support Equipment Emission Reductions*, EPA420-R-99-007, mayo de 1999.

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Red de transferencia de tecnología, *Factor Information Retrieval Data System*, <http://cfpub.epa.gov/oarweb/index.cfm?action=fire.main> (junio de 2020).

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, *Temporal Allocation*,

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, Wilcox, R. S., EPA de los Estados Unidos, Carta a J. Draper, FAA, 22 de noviembre de 2000.

Agencia Europea de Medio Ambiente, *TERM Report 2003 for EU Countries and Accessing Countries*, 2003.

BACK Aviation Solutions (BACK), *Aviation Link: User's Guide*, Edition 16, June 2005.

Baughcum, S.L. et al., *Scheduled Civil Aircraft Emissions Inventories for 1976 and 1984: Database Development and Analysis*, NASA CR 4700, April 1996.

CE Directiva 2004/26/CE, Directiva 2004/26/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de abril de 2004, por la que se modifica la Directiva 97/68/CE relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre medidas contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de los motores de combustión interna que se instalen en las máquinas móviles no de carretera, *Diario Oficial de la Unión Europea* L146, 2004, Bruselas

CEAC, Subgrupo técnico AIRMOD, *Metodología para el cálculo de curvas de ruido alrededor de los aeropuertos civiles*, enero de 2006.

Centro experimental de EUROCONTROL (CEE), *Manual de usuario para la base de datos de aeronave (BADA), Revisión 3.6*, CEE Nota Núm. 10/04, Proyecto ACE-C-E2, 2004.

Comisión Económica para Europa (Naciones Unidas), *Boletín anual de estadísticas de transporte para Europa y Norteamérica*, 2004.

Cooperación europea en la investigación científica y técnica, *New developments in emission estimation from transport*, Report from the Joint Dissemination Conference COST346 – ARTEMIS — PARTICULATES, 2004.

Departamento de Transporte (Estados Unidos), Oficina de Estadísticas de Transporte, *Airline On-Time Performance Data*, 2005.

Departamento de Transporte (Reino Unido), *Project for the Sustainable Development of Heathrow: Air Quality Technical Report*, 19 de julio de 2006,

EMEP/EEA *Air pollutant emission inventory guidebook 2013*. Technical Report No 12/2013; agosto de 2013, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013> (Junio de 2020).

Energy and Environmental Analysis, Inc., *Air Pollution Mitigation Measures for Airports and Associated Activity*, Arlington, VA, Emission Factors for GSE Engines (in grams per BHP-hr), May 1994.

EUROCONTROL, <http://www.eurocontrol.int> (junio de 2020).

- Flughafen Zürich AG, *Aircraft Ground Handling Emissions: Methodology and Emission Factors Zurich Airport*, April 2014, [https://www.zurich-airport.com/~media/flughafenzh/dokumente/das\\_unternehmen/laerm\\_politik\\_und\\_umwelt/luft/2014\\_gse\\_emissionmeth\\_zrh.pdf](https://www.zurich-airport.com/~media/flughafenzh/dokumente/das_unternehmen/laerm_politik_und_umwelt/luft/2014_gse_emissionmeth_zrh.pdf) (junio de 2020).
- Grandi, F., *The MAGENTA Modelling System-Software and Data Structures-Data Management Software Utilities*, Wyle Laboratories, Washington, D.C., 2005.
- Grupo de apoyo sobre pronosticación y análisis económico, *Steering Group Meeting Report of the FESG/CAEP6 Traffic and Fleet Forecast*, FESG CAEP-SG20031-IP/8, octubre de 2003.
- INFRAS: *Handbook Emission Factors for Road Transport, Version 2.1*, Bern, 2004, [www.hbefa-net/](http://www.hbefa-net/) (junio de 2020).
- Janicke Consulting, “LASPORT: A program system for the calculation of airport-induced pollutant emissions and concentrations in the atmosphere”, <http://www.janicke.de/en/lasport.html> (junio de 2020).
- JP Airline Fleets, *JP Fleets International, Aviation Database*, BUCHair U.K. Ltd., diciembre de 2004.
- Lecht, D.L., *The DLR Fuel Flow Method and its Characteristics Compared to Other NO<sub>x</sub> Correlation Methods*, 2005.
- Logiciel IMPACT — Guide Utilisateur*, ADEME Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 1997.
- MEET Project, *Project Report SE/491/98, Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption*, Transport Research Laboratory, 1999.
- MEET Project, *Road Traffic Composition*, Aristotle University of Technology, 1998.
- Registro Federal*, Vol. 38, No 136, Part II, “Control of Air Pollution from Aircraft and Aircraft Engines; Emission Standards and Test Procedures for Aircraft — Final Rule,” 17 de julio de 1973, pp 19088–19103.
- Sociedad de ingenieros automotrices, Aerospace Information Report 1845, *Procedure for the Calculation of Aeroplane Noise in the Vicinity of Airports*, Warrandale, PA, marzo de 1986.
- Xie, S. et al., “On-Road Remote Sensing of Vehicle Exhaust Emissions in Auckland New Zealand,” *Clean Air and Environmental Quality*, Volume 39, No. 4, noviembre de 2005.







ISBN 978-92-9265-342-2



9

789292

653422