

# Análisis de mitigación de ruido aeroportuario. El caso del aeropuerto internacional de Bogotá-El Dorado (Colombia)

Óscar DÍAZ OLARIAGA

Profesor-Investigador. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás. Bogotá (Colombia)

**RESUMEN:** El presente artículo analiza la gestión de la mitigación de la contaminación acústica generada por un gran aeropuerto, con una alta tasa de crecimiento de tráfico aéreo, y rodeado de zonas residenciales densamente pobladas. Para el caso de estudio, el Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado (Colombia), se analizan y evalúan las diferentes acciones desarrolladas basadas todas ellas en el «enfoque equilibrado» de la OACI, con el objetivo de mitigar la contaminación acústica producida por el aeropuerto en su zona de influencia más próxima. Se presentan y evalúan los resultados conseguidos. Los principales logros de la política ambiental implementada en el aeropuerto, en materia de ruido, muestran que el número de personas expuestas al año 2014 se ha reducido con respecto al existente en el año 2002 en un 40%, mientras la población de las localidades que circundan el aeropuerto ha aumentado (aproximadamente en un 180%), como así también las operaciones en el aeropuerto (en un 120% en el mismo periodo).

**DESCRIPTORES:** Polución acústica aeroportuaria. Mitigación del ruido. Mapa de ruido. Enfoque equilibrado. Colombia

## Analysis of airport noise mitigation. The case of Bogotá-El Dorado International Airport (Colombia)

**ABSTRACT:** This article analyzes the management of noise pollution mitigation generated by a large airport, with a high growth rate of air traffic, and surrounded by densely populated

Recibido: 25.10.2017; Revisado: 27.02.2018

Correo electrónico: [oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co](mailto:oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co) Nº ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4858-3677>

El autor agradece los comentarios y sugerencias realizados por los evaluadores anónimos, que han contribuido a mejorar y enriquecer el manuscrito original.

residential areas. For the case study, Bogotá-El Dorado International Airport (Colombia), the different actions developed are analyzed and evaluated all of them based on the «balanced approach» of the ICAO, with the objective of mitigating the acoustic pollution produced by the airport in its surrounding area. The results obtained are presented and evaluated. The main achievements of the environmental policy implemented regarding the noise mitigation at the airport show that the population exposed at the year 2014 has decreased by 40% in comparison with 2002, while both the population of localities surrounding the airport and operations at the airport have increased in the same period, approximately by 180% (population) and 120% (operations).

**KEYWORDS:** Airport noise pollution. Noise mitigation. Noise map. Balanced approach. Colombia.

## 1. Introducción

El Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado (en adelante BOG), situado en la ciudad de Bogotá (capital de Colombia), es el primer terminal aeroportuario del país y aeropuerto distribuidor (*Hub*) de la red local de transporte aéreo; y a nivel regional, en Latinoamérica, es el primer terminal en transporte de carga aérea y tercero por número de pasajeros transportados (DÍAZ OLARIAGA & ÁVILA, 2015). El aeropuerto, de propiedad pública, es operado por un concesionario privado desde el año 2007, esta concesión implicó una gran ampliación y modernización de su infraestructura (DÍAZ OLARIAGA, 2017a, 2016). Este aeropuerto ha liderado el importante crecimiento del transporte aéreo colombiano experimentado desde la liberalización de la industria de la aviación en el país, que dio inicio en el año 1991; entre este año y el 2015 el transporte de pasajeros totales en el aeropuerto creció un 650% (principalmente impulsado por el transporte doméstico), mientras que el transporte de carga aérea creció un 200% (impulsado por el transporte de carga internacional) (AEROCIVIL, 2017).

En otro orden, el dinámico crecimiento de la ciudad de Bogotá (la más poblada del país con una población de ocho millones de habitantes (DANE, 2018)) en las últimas tres décadas condujo a un no controlado/no planificado desarrollo urbano en el entorno más próximo del recinto aeroportuario, hasta quedar éste hoy en día literalmente «absorbido» por la ciudad, sobre todo desde sus caras norte, sur y este. Esta situación, por un lado, de dinámico y mantenido crecimiento del transporte aéreo en el aeropuerto que motivó la ampliación del mismo cuando se concesionó (2007) (actualmente está en una segunda fase de ampliación que

culmina en 2018), y por otro lado, de la presión urbanística hacia el entorno del aeropuerto, empezó a ser fuente de serios problemas medioambientales en su zona de influencia desde finales de la década de 1990 (LONDOÑO & *al.*, 2003).

En base a esta situación de aumento del impacto ambiental en el entorno del aeropuerto y que se acentúa en los últimos años debido al continuo crecimiento de las operaciones, motivó que la autoridad ambiental de Colombia haya regulado la actividad del aeropuerto con varias normas, y cada vez más estrictas, a lo largo de las últimas dos décadas. En este contexto la Autoridad de Aviación Civil de Colombia (en adelante Aerocivil) encuentra preocupante la continuidad de las restricciones existentes sobre el uso de la pista sur del aeropuerto, y estima que exacerbará aún más la congestión (en la actualidad BOG es un «aeropuerto coordinado» (DÍAZ OLARIAGA, 2010)). El aumento de la congestión y el «acotado (o limitado)» crecimiento debido a las restricciones existentes en el aeropuerto inevitablemente puede llegar a afectar la conectividad y si ésta se obstaculiza puede generar un impacto negativo en la economía tanto regional como nacional (dada la importancia del aeropuerto en el contexto de la economía colombiana) (IATA, 2015).

Ahora bien, dado que las restricciones operativas en BOG se adoptaron considerando los niveles de ruido de aeronaves en operación hace más de dos décadas, se estima que la situación en esta materia en BOG y las medidas necesarias para hacerle frente deben ser reevaluadas urgentemente. En particular, teniendo en cuenta las menores emisiones sonoras de las aeronaves actuales, pueden bastar medidas menos restrictivas para mitigar adecuadamente su impacto acústico. Una nueva evaluación de la

situación del ruido en el aeropuerto en estudio y las medidas para abordar el ruido también serían coherentes con el «enfoque equilibrado» para la gestión del ruido de aeronaves (ICAO, 2013). El objetivo de este punto de vista es garantizar que las autoridades competentes seleccionen las medidas más efectivas teniendo en cuenta el coste o una combinación de medidas para hacer frente a los problemas de ruido. Esta perspectiva proporciona a las autoridades aeroportuarias una herramienta para encontrar un balance óptimo entre los beneficios ambientales que pueden lograrse y la eficiencia del transporte aéreo, al tiempo que garantiza la transparencia del proceso. La Autoridad de Aviación Civil de Colombia ha venido actuando en esta línea durante varios años con el objetivo de mitigar el impacto medioambiental producido por el ruido generado por el aeropuerto en cuestión (AEROCIVIL, 2014, 2009, 2008).

Finalmente, y en otro orden, la necesidad de desarrollar e implementar programas y medidas de mitigación de la contaminación acústica obedece a que el ruido es un problema que afecta la salud y el bienestar de los residentes en el área de influencia del aeropuerto. Trabajos epidemiológicos sugieren que la exposición al ruido de los aviones está relacionada con ciertos efectos negativos en el desempeño psicológico, fisiológico y cognitivo de los afectados. Estos incluyen alteraciones y/o interrupción del sueño (FYHRI & AASVANG, 2010; MIEDEMA, 2007; FRANSSEN & *al.*, 2004), aumento del estrés (MEISTER & DONATELLE, 2000; BRONZAFT & *al.*, 1998), hipertensión (BABISCH, 2006; ROSEN LUND & *al.*, 2001), dificultades de lectura para niños (HAINES & *al.*, 2002) y la pérdida de la audición (CHEN & *al.*, 1997). Otros estudios afirman que la sensibilidad al ruido puede ser un factor de riesgo para personas con problemas cardiovasculares (HEINONEN-GUZEJEV & *al.*, 2007), y con trastornos mentales (SCHRECKENBERG & *al.*, 2010).

El objetivo de la presente investigación es describir, analizar y evaluar de qué manera se puede gestionar la mitigación de la contaminación acústica generada por un gran aeropuerto, rodeado de zonas residenciales densamente pobladas de una gran ciudad, y se considera como caso de estudio el Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado.

## 2. Revisión de la bibliografía

Existe una extensa bibliografía reciente en el tratamiento del ruido aeroportuario, su impacto y sobre los procedimientos de atenuación y/o

mitigación del mismo. A continuación se citan algunas investigaciones relevantes.

VOGIATZIS (2012) realiza una investigación sobre la evaluación de planes de acción contra el ruido de aeronaves aplicado a un aeropuerto de Chipre con el objetivo de aportar elementos a la gestión del uso del suelo en el entorno del aeropuerto. En su trabajo VOGIATZIS (2012) realiza una revisión de dos procedimientos de evaluación y de acción enfocados en la zona de influencia del aeropuerto con énfasis en: a) un cálculo completo de mapa de ruido en dos escenarios de operación del aeropuerto, el actual y el futuro; b) una evaluación de los resultados con énfasis en la exposición a varios niveles de ruido de los habitantes cercanos al aeropuerto; y c) una evaluación de los planes de acción contra el ruido.

ZACHARY & *al.*, (2010) describen un problema de evaluación y minimización del ruido de la aviación entorno a un aeropuerto de Luxemburgo. Su metodología de análisis evalúa el ruido en el entorno urbano del aeropuerto (siendo explorados diferentes impactos sobre la población) a través de indicadores relacionados a las trayectorias de aproximación y despegue de aeronaves utilizando datos de operaciones de una particular línea aérea de carga. Asimismo dichos autores implementan, en programación, un conjunto de escenarios basados en trayectorias (aproximación y despegue), programación de los vuelos y composición de la flota. La metodología de programación propuesta se utiliza para buscar el mínimo impacto medioambiental.

OZKURT & *al.*, (2014) calcularon los niveles de exposición al ruido en la proximidad del Aeropuerto Ataturk de Estambul. De sus cálculos los autores llegaron a los siguientes importantes resultados: a) el 1,2% de la superficie de la ciudad de Estambul excede el umbral de 55 dB(A) durante el día; b) en la noche el 1,3% de la población está expuesta a 55 dB(A) o a niveles más altos de ruido; c) el 1% de la población está expuesta a niveles de ruido superiores a 65 dB(A); y d) la restricción de uso del aeropuerto es la única alternativa para mitigar la contaminación acústica que produce. Sobre este último aspecto, OZKURT & *al.*, (2014) concluyen que, y según sus proyecciones, todo cambio de programación de uso de pista, en los procedimientos de aproximación y despegue, o la modificación de instalaciones aeroportuarias, no podría ser una solución real para la reducción de los niveles de ruido. Por lo que afirman que la restricción de utilización del aeropuerto y la mejora de las normas del

aeropuerto son las únicas soluciones que se pueden aplicar al aeropuerto.

ARAFA & *al.* (2007) analizan, con un enfoque de evaluación, el ruido generado por un aeropuerto en Egipto y su impacto en el entorno del mismo. El ruido de los aviones fue modelado utilizando el Modelo Integrado de Ruido (INM) con el fin de simular el actual, y futuro, nivel de ruido en el supuesto de un crecimiento de las operaciones en el aeropuerto, como así también del crecimiento urbano de la región próxima al aeropuerto. Sobre la base de medidas actuales, y simuladas, los autores sugieren esquemas de mitigación de ruido para aliviar el impacto de la contaminación acústica actual y futura.

LICITRA & *al.* (2014) estimaron el impacto del ruido producido por un aeropuerto en Italia y su influencia en la población residente cercana al aeropuerto utilizando el Modelo Integrado de Ruido (INM). Los autores simularon mapas de ruido para el presente y escenarios futuros incluidos aquellos bajo el supuesto de la aplicación de medidas de reducción de ruido. Los estudios fueron capaces de cuantificar el impacto social del fenómeno teniendo en cuenta el aumento o la disminución en el número de las personas expuestas para cada escenario. Los resultados del estudio muestran que las medidas de mitigación propuestas contribuirían a reducir el impacto del ruido sobre la población.

SCATOLINI & *al.* (2016) analizan las dificultades encontradas al tratar de aplicar el concepto denominado 'enfoque equilibrado' (ICAO, 2013) en la mitigación de la contaminación acústica en los aeropuertos brasileños (aunque utilizaron como caso de estudio el Aeropuerto de Congonhas en la ciudad de Sao Paulo). Sus resultados muestran que a través de la reprogramación de sólo el 13% las operaciones diarias, durante períodos críticos, se genera un efecto significativo en la disminución de la área acústicamente contaminada en casi un 50%.

SADR & *al.*, (2014) realizaron un estudio sobre la planificación del uso del suelo alrededor de los aeropuertos, considerando a éstos como fuentes de contaminación acústica, como caso de estudio se trabajó sobre el Aeropuerto de Teherán en Irán. Mediante mapas de ruido los autores simularon varios escenarios, actual y futuros, evaluaron los resultados con énfasis en el uso del suelo del área de estudio (próxima al aeropuerto) y la exposición de los residentes en los diferentes niveles de ruido ambiental y analizaron también la intensidad de la molestia del ruido de aeronaves en diversos momentos del día y de la noche. Sus predicciones afir-

man que aumentará la contaminación acústica como así también el desarrollo urbano próximo al aeropuerto, por lo que consideran esencial una adecuada gestión y control del ruido en el aeropuerto. Por otro lado concluyen que si bien las estrategias de mitigación del ruido pueden ayudar a reducir el impacto negativo de la contaminación acústica del aeropuerto la comunicación / coordinación de planificación conjunta con las comunidades circundantes es esencial para abordar el conflicto de uso del suelo.

En un estudio reciente OZKURT & *al.*, (2015) (usando como caso de estudio un aeropuerto en Turquía) concluyen que el uso de encuestas y monitorizaciones puede ser insuficiente para estimar con precisión los efectos del ruido en la salud pública generado por un aeropuerto, ya que sólo representan áreas muy limitadas. Los autores sugieren que el desarrollo de mapas de ruido es una forma alternativa para identificar los puntos conflictivos de ruido (áreas de exposición) en todas las zonas afectadas y facilitar la formulación de políticas para la reducción del ruido. Además, los autores afirman que los mapas de ruido revelan dónde empezar con los planes de mitigación.

Y finalmente, POSTORINO & MANTECCHINI (2016) proponen un proceso de evaluación para determinar los efectos de las acciones adoptadas para reducir el impacto del ruido del aeropuerto en las zonas pobladas. Factores relacionados con el aeropuerto, como el número de despegue y aterrizajes, distribuciones día-tarde-noche de movimientos, tipo de aeronave, trayectorias de aproximación y despegue, y factores relacionados con las características del uso del suelo, se combinan en un índice que sintetiza los impactos del ruido del aeropuerto en el territorio circundante. El proceso de evaluación ha sido probado en un caso real, el aeropuerto de Bolonia (Italia). Los autores concluyen que la fiabilidad de sus resultados fomenta el uso del proceso de evaluación propuesto como sistema de ayuda a la toma de decisión de la gerencia del aeropuerto.

### 3. Marco normativo y operacional

#### 3.1. Marco normativo

Los niveles sonoros permitidos en viviendas y comunidades causadas por la aviación civil son fijados por reglamentos específicos, ya sean internacionales o nacionales (GARCÍA & GUILLAMÓN, 2004). La principal institución a nivel internacional que se ocupa de las cuestiones sobre el ruido generado por los aviones comerciales, en



el entorno de un aeropuerto, es la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), y ésta lo hace a través del Anexo 16 (OACI, 2008). Este documento contiene las normas, recomendaciones y directrices para la certificación de ruido de los aviones. Además presenta criterios para el monitoreo de ruido alrededor del aeropuerto, la evaluación del mismo y la definición de reglas para la reducción del ruido a través de procedimientos operacionales.

El Comité de la OACI sobre la Protección del Medio Ambiente por la Aviación (en inglés CAEP - *Committee on Aviation Environmental Protection*), que trata los problemas de ruido del tráfico aéreo, ha promovido un «enfoque equilibrado» (*balanced approach*) con el objetivo principal de reducir el impacto del ruido ambiental de las operaciones aeroportuarias (ICAO, 2013). De acuerdo con este enfoque equilibrado hay cuatro áreas principales en las que las acciones pueden ser implementadas para mitigar los efectos negativos del ruido generado por la aviación comercial (ICAO, 2013, 2008):

- promover y apoyar estudios y programas de investigación y tecnología dirigidas a reducir el ruido en la fuente, teniendo en cuenta las interdependencias con otras preocupaciones ambientales;
- aplicar políticas de planificación y gestión de uso del suelo (para limitar la expansión urbana incompatible en áreas sensibles al ruido) y medidas de mitigación para las zonas afectadas;
- aplicar procedimientos operacionales de atenuación del ruido en la medida de lo posible sin afectar a la seguridad y teniendo en cuenta las interdependencias con otras preocupaciones ambientales; y
- no aplicar restricciones operativas como primer recurso, sólo hacerlo después de considerar los beneficios que pueden obtenerse de otros elementos del enfoque equilibrado y siempre de una manera que sea consistente con el Apéndice E de Resolución A37-18 (ICAO, 2013), y teniendo en cuenta el posible impacto de dichas restricciones en otros aeropuertos.

En cuanto a la primera acción se han realizado muchos esfuerzos tecnológicos para reducir el ruido en la fuente mediante la construcción de aviones cada vez más silenciosos (principalmente sus motores) (JANIC, 2011; UPHAM & *al.*, 2003). Simultáneamente las aerolíneas modernizan sus flotas para evitar ser penalizadas en ciertos países (con reglamentaciones medioambientales muy estrictas) a causa del ruido que generan las aeronaves más antiguas. Sobre la segunda acción, cuando las áreas urbanas se expanden o nacen nuevas zonas urbanas en la periferia de las grandes ciudades, el objetivo principal es evitar que ciertas zonas próximas al aeropuerto se vean afectadas por el ruido de los aviones (JANIC, 2011; GUILLAMÓN, 2010; GREAVES & COLLINS, 2007). La tercera acción se refiere principalmente a una mejor gestión en los procedimientos de despegue y aterrizaje con el fin de que (sin sacrificar operaciones) se cumpla con restricciones ambientales cada vez más estrictas (PRICE & FORREST, 2016; COKORILLO, 2016; ASHFORD & *al.*, 2013; HORONJEFF & *al.*, 2010; VISSER, 2005; CLARKE, 2003; VISSER & WIJNEN, 2001). Y en cuanto a la cuarta acción, en caso de no quedar otra alternativa, aplicar restricciones operativas de tráfico aéreo para reducir o limitar el mismo en los aeropuertos sensibles al ruido, sobre todo durante la noche (KAZDA & CAVES, 2015; DE NEUFVILLE & ODONI, 2013; DALEY, 2010; JANIC, 2007; UPHAM & *al.*, 2003; GIRVIN, 2009).

Por otro lado, el proyecto regional RLA/92/031, «Manual-guía de protección ambiental para aeropuertos» (OACI, 1999), contempla un Plan de Zonificación del Ruido (PZR) que es un instrumento que orienta y viabiliza, a largo plazo, una zonificación del uso del suelo adecuado para las áreas afectadas por el ruido aeronáutico. En Colombia los niveles de ruido ambiental son regulados por la Resolución 627 del 7 de Abril de 2006 (MINAMBIENTE, 2018) expedida por la Autoridad Ambiental Nacional; esta norma determina en el Artículo 17 del Capítulo III los niveles máximos permisibles por ruido ambiental, definido como el ruido total en la zona debido a fuentes presentes (ver FIG. 1 y 2).

Fig. 1/ Estándares máximos permisibles para ruido ambiental según uso del suelo.

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, dB (A)	
		Día	Noche.
<b>Sector A.</b> <b>Tranquilidad y Silencio</b>	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	45

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, dB (A)	
		Día	Noche.
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hostelería y hospedajes.	55	45
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.	65	50
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques (de atracciones) al aire libre.		
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	70
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	55
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	50
	Zonas con usos institucionales.		
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales.	80	70
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana.		
	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.	55	45
	Zonas de recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.		

Fuente: MINIAMBIENTE 2018

FIG. 2/ Horarios día-noche (según normativa vigente)

Tipo de horario	Hora de inicio	Hora final
Diurno	7:01 am	9:00 pm
Nocturno	9:01 pm	7:00 am

Fuente: MINIAMBIENTE 2018

### 3.2. Marco operacional

En lo que se refiere a la medición de los niveles sonoros producido por aviones, los mismos se pueden medir por sucesos (o eventos) acústicos individuales o simples (el ruido ocasionado por el paso de un avión) o por sucesos múltiples sobre la población expuesta durante un intervalo de tiempo (por ejemplo, el estudio del ruido producido por un aeropuerto durante 24 horas) (LICITRA, 2013). En el caso de la presente investigación, es decir el estudio de un área o zona que rodea a un aeropuerto, el análisis del ruido debe incluir un mapa mostrando las curvas isofónicas para el área afectada dibujadas en incrementos de 5 dB que representan valores constantes del nivel sonoro día-noche. Con ello es factible analizar la compatibilidad del uso del suelo en la vecindad de un aeropuerto (POSTORINO, 2010). En los mapas de ruido las líneas isofónicas pueden basarse sobre: a) medidas reales en la zona de estudio (monitoreo); b) predicciones basadas sobre localizaciones parecidas a las que se están considerando; y c) métodos predictivos para estimar los niveles de ruido existentes a partir de conocer los niveles generados por la fuente y las condiciones del área.

Las técnicas de monitoreo y modelado de ruido sirven para medir y evaluar el ruido de los aviones en la proximidad de los aeropuertos, y pueden llevarse a cabo para varias finalidades (OACI, 2002, 1999): (a) caracterizar la ocurrencia de ruido de los aviones en un lugar específico; (b) informar y verificar ejercicios de modelado de ruido; (c) investigar el grado en el que las aeronaves respetan las restricciones relacionados con el ruido (en lo que respecta a las rutas de vuelo); (d) proporcionar datos como base para la gestión de la mitigación del ruido; y (e) como fuente de información por parte del operador del aeropuerto a las comunidades vecinas (DALEY, 2010). Los datos obtenidos a través de programas de monitoreo del ruido pueden ser usados para: (1) identificar determinados momentos, durante el día y la noche, cuando se verifican eventos de ruido y correlacionar dichos eventos con los procedimientos de tráfico aéreo preestablecidos; (2) identificar las aeronaves más silenciosas y las más ruidosas; (3) evaluar la exactitud de los registros de las tripulaciones de vuelo y de cualquier relación entre registros inadecuados, las quejas relacionadas con el ruido y los niveles sonoros en la superficie; (4) comparar la carga de ruido asociado a diferentes rutas de llegada o salida, o con operaciones utilizando diferentes pistas; (5) investigar

una variedad de otros efectos, tales como los de la climatología local en los niveles de ruido recibidos en la superficie; (6) analizar los factores que pueden dar lugar a quejas relacionadas con el ruido; y (7) investigar la eficacia de los procedimientos de atenuación del ruido (JANIC, 2011; DALEY, 2010; ZACHARY & *al.*, 2010; UPHAM & *al.*, 2003).

Los parámetros acústicos de medida establecidos para la presente evaluación siguen los términos de referencia definidos por la Autoridad Ambiental de Colombia (Resoluciones 1330 y 1389 de 1995, y Resolución 627 de 2006):

- a) LD: Indicador equivalente al valor ponderado  $A L_{Aeq}$  en horario diurno  $L_{AeqD}$  de 7:01 am a 9:00 pm.
- b) LN: Indicador equivalente al valor ponderado  $A L_{Aeq}$  en horario nocturno  $L_{AeqN}$  de 9:01 pm a 7:00 am.
- c) LDN: Indicador ponderado de LD y LN (día-noche), con una penalización de 10 dB al valor LN antes de hacer la ponderación. Es usado corrientemente para definir el ruido en los alrededores de los aeropuertos y la curva de 65 dB de LDN es usado como un criterio para calificar los programas de mitigación de ruido. LDN se calcula de la siguiente manera:

$$LDN = 10 \cdot \text{Log} \frac{14 \cdot 10^{\left(\frac{LD}{10}\right)} + 10 \cdot 10^{\left(\frac{LN+10}{10}\right)}}{24}$$

- d) L90, L50, L20, L10, L5, L3: percentiles al 90%, 50%, 20%, 10%, 5%, 3% de los niveles  $L_{Aeq}$  registrados. Representan datos de distribución estadística de la información procesada.
- e)  $L_{max}$ :  $L_{Aeq}$  máximo registrado.
- f)  $L_{peak}$ : nivel pico de los niveles de presión sonora en ponderación frecuencial C.
- g) CNEL: nivel equivalente de ruido comunitario, ponderado a las 24 horas como el indicador LDN solo que con una adición de 5 dB para las horas de la tarde (7pm a 10pm), y con una adición de 10 dB para las horas de la noche (10pm a 7am).

Los indicadores LD, LN, percentiles,  $L_{max}$ ,  $L_{peak}$  y CNEL son acordes a los definidos por la normativa colombiana vigente. De igual manera al corresponder a niveles de presión sonora continuo equivalente ponderado en A y en Slow, las cuales equivalen a ponderaciones frecuenciales y temporales en cumplimiento a esta resolución, son ajustados previamente por presencia de componentes tonales (Ajuste KT) e impulsivos (Ajuste KI).

#### 4. Caso de estudio. Metodología

##### 4.1. Características del aeropuerto de estudio

El Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado (código IATA: BOG; código OACI: SKBO), situado en la ciudad de Bogotá D.C. (capital de Colombia) es de propiedad pública pero con operación concesionada desde el año 2007 (DÍAZ OLARIAGA, 2017a, 2016), año en que el aeropuerto experimentó el inicio de una importante ampliación de su infraestructura e instalaciones que culminó en el año 2013. En el año 2105 inició una segunda ampliación que finaliza a finales de 2018 (ANI, 2018). El aeropuer-

to (situado a 2.547 m sobre el nivel del mar) cuenta con un área aproximada de 975 ha, se encuentra a 12 Km del centro de la ciudad, y limita con las localidades de Fontibón y Engativá, ambas pertenecientes administrativamente a la ciudad de Bogotá, y con la zona rural de la ciudad de Funza (ver FIG. 3). El aeropuerto cuenta con un sistema de dos pistas paralelas, 13L/31R (pista norte) y 13R/31L (pista sur), ambas para operaciones de despegue y aterrizaje, y cada una con una longitud y ancho de 3.800 x 45 m. Las estadísticas al cierre del año 2016 indican que el aeropuerto movilizó 30 millones de pasajeros totales, 560 mil toneladas de carga aérea totales y gestionó 343 mil operaciones totales (AEROCIVIL, 2017).

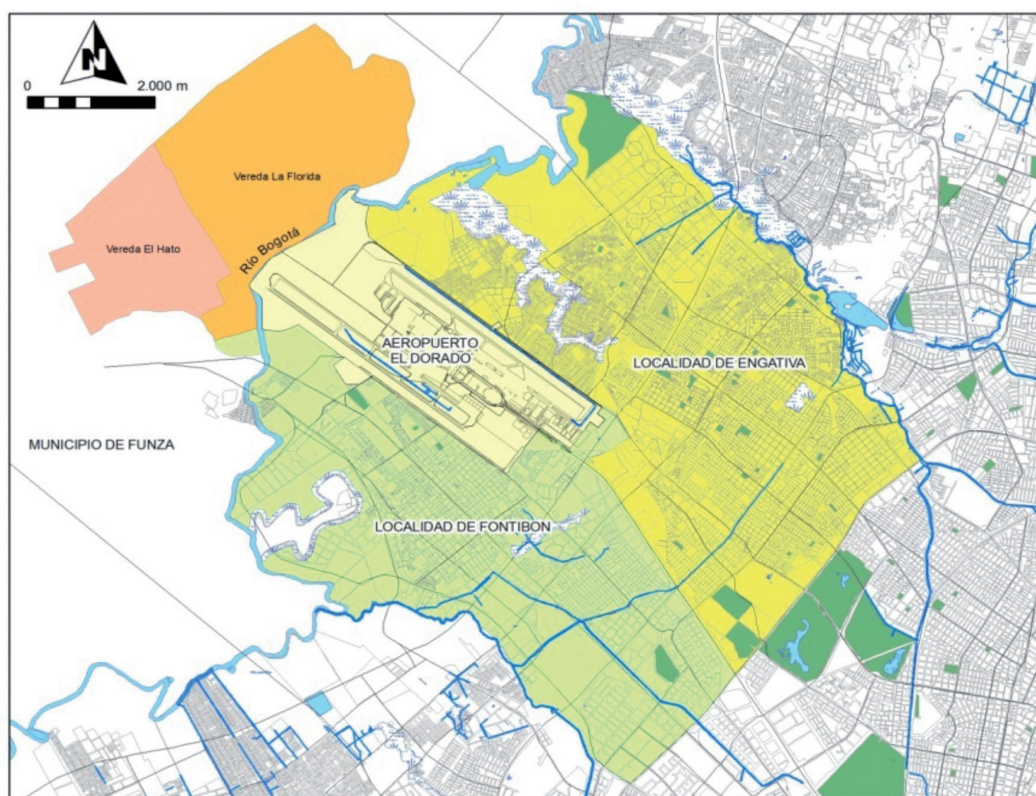


FIG. 3/ Ubicación del Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

##### 4.2. Acciones de mitigación del ruido en el aeropuerto de estudio

Las estrategias y acciones en materia de mitigación del ruido en el aeropuerto en estudio,

que comenzaron en el año 1998, van en la línea del enfoque equilibrado de la OACI antes detallado (ICAO, 2013, 2008). Por ello, en 1998 Aerocivil desarrolló el «Manual de Procedimientos para Abatimiento de Ruido del Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado» (posteriormente actualizado en el año 2008).



En primer lugar, en lo que se refiere a la reducción del ruido en la fuente, y de acuerdo con la normativa local vigente, todas las aerolíneas que operan hoy en el espacio aéreo colombiano lo hacen con aeronaves que corresponden a las mencionadas en los Capítulo 3 y Capítulo 4 del Anexo 16 de la OACI (OACI, 2008), siendo éstas las aeronaves que menos impacto sonoro producen en su operación. De igual forma las compañías aéreas colombianas en aras de mejorar sus estándares de operación están modernizando sus flotas aéreas, encontrando que las aeronaves disponibles en los mercados deben estar certificadas para cumplir con los requerimientos ambientales y las tendencias mundiales de reducción de ruido. Para disminuir los impactos por ruido hacia las comunidades en horarios preferentemente nocturnos, a partir de las 9:01 pm y hasta las 7:00 am se privilegia el uso de aeronaves de Capítulo 4 del Anexo 16 de la OACI. En conclusión, desde el año 2003 ningún operador aéreo nacional o extranjero opera con aeronaves que no cumplan los niveles de ruido previstos en el Capítulo 3 del Anexo 16 de OACI excepto en los siguientes casos: las aeronaves de Estado, en misiones sanitarias o humanitarias esporádicas, en situación de emergencia, y las que cuenten con un permiso especial.

En segundo lugar, y en lo que se refiere a la planificación y gestión del uso del suelo, este concepto no le compete a la Autoridad Aeronáutica Civil de Colombia, ya que la gestión (y políticas de restricción) del uso del suelo es responsabilidad de las autoridades municipales (gobiernos locales) a través de los denominados Plan de Ordenamiento Territorial-POT (ALCALDÍA DE BOGOTÁ, 2018a). La ubicación de un aeropuerto normalmente genera ciertos efectos negativos tales como la polución sonora en las comunidades próximas a los aeropuertos. Estas dificultades pueden ser superadas en la medida que se planifique el desarrollo de su entorno con las respectivas autoridades municipales, quienes deben establecer restricciones al uso de suelos como una forma de control del crecimiento urbano. La planificación territorial es una acción eficaz para impedir que el problema aumente y prevenir que las construcciones legales e ilegales se intensifiquen en áreas no permitidas, estableciendo una zonificación del uso del suelo, es decir una distribución espacial de las funciones de la ciudad según sus actividades y sus instalaciones urbanas de acuerdo a las áreas afectadas por el ruido e indicando las actividades más adecuadas para cada área. En base a este concepto Aerocivil ha emitido directrices frente al adecuado uso del suelo en

las zonas aledañas (AEROCIVIL, 2009), tomando como base las curvas de ruido.

Por otro lado, en el año 2015 Aerocivil implementó para el aeropuerto en estudio un Sistema de Vigilancia y Control Ambiental (SVCA), a través del cual se puede detectar, medir y asociar el ruido producido por las aeronaves que operan en el aeropuerto con las operaciones realizadas por los operadores aéreos. Este sistema asocia los procedimientos y los niveles de ruido para verificar el cumplimiento de las operaciones descritas en el manual de abatimiento de ruido, la Publicación de Información Aeronáutica, las circulares de operación y otras medidas adoptadas por Aerocivil para mitigación del ruido. El SVCA difiere del monitoreo estándar en que integra información específica aeronáutica de cada operación (nombre de la aerolínea, altura, trayectoria, destino, meteorología, pista utilizada, etc.) al instante de suceder a razón de que las estaciones de monitoreo están enlazados con el radar del aeropuerto, y en tiempo real se determina si la aeronave cumplió con los niveles máximos permisibles de ruido. Con el SVCA se dispone de niveles de presión sonora las 24 horas del día, 7 días a la semana y se pueden asociar éstos a cada operación por aeronave y aerolínea. En base al SVCA se puso en marcha la implementación de un protocolo sancionador para hacerlo efectivo a todas las aerolíneas que operan en BOG. Estas acciones tienen como finalidad generar un seguimiento y control ambiental para las diversas actividades relacionadas con la operación y funcionamiento del aeropuerto, dando aplicación a su política ambiental la cual está orientada a minimizar los riesgos para la salud, la seguridad y el medio ambiente.

Desde el punto de vista de las restricciones a las operaciones, desde el año 1995, y por resolución de la Autoridad Ambiental Nacional, el aeropuerto sufre restricciones operacionales (horario, rutas de vuelo y dirección de operación), por lo cual se da preponderancia al descanso de las comunidades vecinas por medio de variaciones operacionales. Y paralelamente, hubo cambios importantes en los procedimientos de aproximación y despegue, por ejemplo antes los procedimientos se realizaban considerando que al alcanzar una altura de 400 pies con respecto al suelo se podía realizar los banqueos o giros, hoy en día la altura mínima tenida en cuenta antes de realizar estos giros a una velocidad determinada es de 840 pies en relación al nivel del suelo, con lo cual se ha mitigado más el ruido generado por las aeronaves en ciertas vecindades.



En otro orden, en el aeropuerto en estudio se construyeron barreras físicas (llamadas «jarillones») contra el ruido las cuales tienen una altura considerable (4,5 metros en la pista 13L y 3,7 metros en la pista 13R) y que permiten mitigar en parte el ruido generado por las aeronaves en el momento del carreteo; no obstante, estas barreras no tienen ninguna incidencia en el momento de los despegues, en el cual se presenta el mayor nivel de ruido.

Y finalmente, por las exigencias de la Autoridad Ambiental Nacional (Resoluciones 534 y 745 de 1998), Aerocivil desarrolló un manual de diseño y un programa de instalación de las alternativas de mitigación propuestas para las diferentes edificaciones que se encuentran ubicadas por encima de la curva Ldn 65 dB(A) (*Manual de atenuación de ruido de las aeronaves para el Aeropuerto Internacional El Dorado*; AEROCIVIL 2008). En esta línea, se dividió en varias zonas (cinco) el área circundante al aeropuerto expuesta al ruido y para cada una de las zonas se fijaron ciertos

criterios generales de control, por ejemplo, a) en las edificaciones de las zonas situadas paralelas (y muy próximas) a las pistas se reforzaron los controles en ventanas, puertas y paredes con materiales de mayor atenuación; y b) en las edificaciones ubicadas próximas a las cabeceras de las pistas se reforzó el control en los cielorrasos y techos en general.

4.3. Clasificación y calificación del suelo

Según la normativa local vigente (ver FIG. 1) en la FIG. 4 se muestran las zonas según uso del suelo en las que se clasifica el Área de Influencia Directa (AID) del aeropuerto en estudio. Los usos de suelo predominantes identificados, en función de la normativa vigente, para las tres comunidades que hacen parte del AID del aeropuerto (Municipio de Funza, Localidades Fontibón y Engativá) son: residencial, recreacional, industrial y rural.

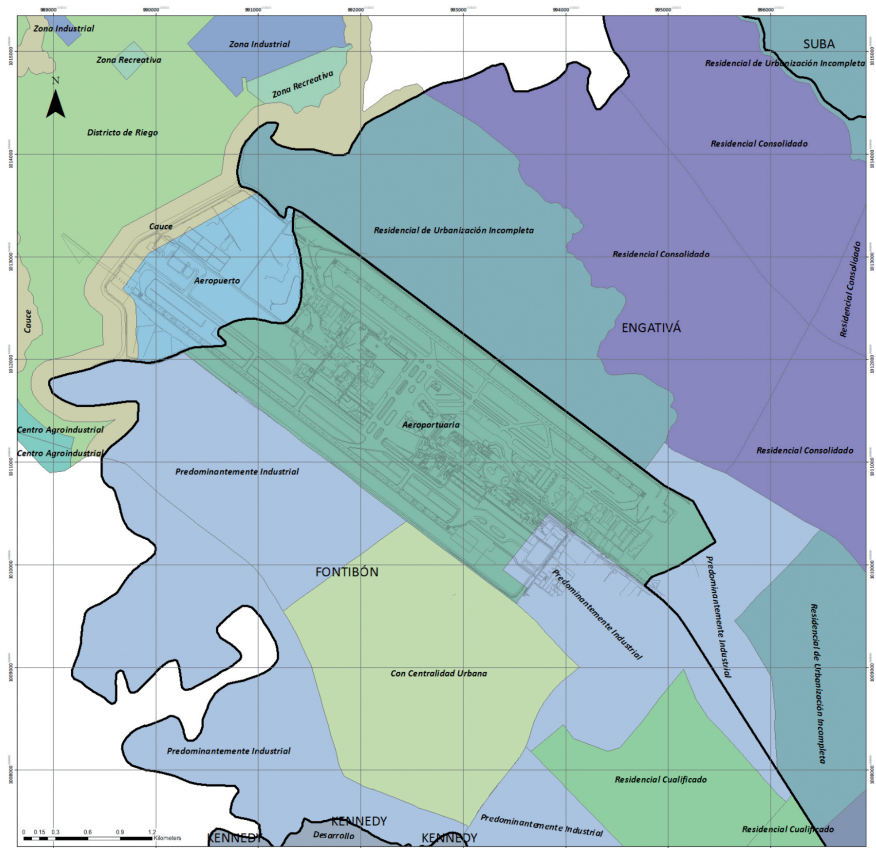


FIG. 4/ Usos del suelo en el AID del aeropuerto en estudio

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

#### 4.4. Modelado del ruido

En el año 2014 la Autoridad Aeronáutica de Colombia llevó a cabo el proyecto de simular las propagaciones de ruido generado por las actividades realizadas en el aeropuerto de estudio teniendo en cuenta las condiciones de operación normal que se realizaron en ese año en dicho aeropuerto. El proyecto de modelado de ruido tenía los siguientes objetivos principales:

- Relacionar las configuraciones de uso de las pistas utilizadas en el aeropuerto con las condiciones meteorológicas que se pueden presentar, y su contraste con las condiciones de operación autorizadas por entonces (recordando que el aeropuerto opera con restricciones).
- Simular la propagación de ruido en las vecindades del aeropuerto ocasionado por las operaciones aéreas realizadas, calculando los siguientes indicadores:  $L_{Aeq}$  24 horas,  $L_d$ ,  $L_n$ ,  $L_{dn}$ , SEL 24 horas, LAMAX 24 horas, TALA65, TALA75, TALA85, TALA92, NAT65, NAT75, NAT85 y NAT92.
- Simular la propagación de ruido en las vecindades del aeropuerto generado por las operaciones realizadas en tierra, calculando los siguientes indicadores:  $L_d$ ,  $L_n$  y  $L_{dn}$ , y considerando las siguientes actividades dentro del recinto de prueba de motores: pruebas por 45 minutos, por 5 minutos y sin realizar prueba de motores.
- Cuantificar predios y personas afectadas dentro de la curva de 65 dB(A)  $L_{dn}$  teniendo en cuenta las condiciones de operación normal por entonces, y comparación de estos resultados con modelaciones de años anteriores.
- Definir el área de influencia directa (AID) del aeropuerto.
- Calcular los conflictos de uso del suelo en el área de influencia directa del aeropuerto con base a los indicadores  $L_d$  y  $L_n$  y el escenario «condiciones de operación normal (año 2014)».
- Y en definitiva, evaluar el impacto y resultados de las acciones de mitigación del ruido (en el aeropuerto en estudio) iniciadas varios años atrás.

El desarrollo de este estudio se dividió en dos partes: modelados de propagación de ruido generado por las actividades realizadas en el aire, y por otro lado, la simulación de la propagación ocasionado por las operaciones ejecutadas en tierra. Para el primer caso se utilizó el *Integrated Noise Model* (INM), versión 7.0d de la FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2007). Con este software se calcularon los in-

dicadores ya mencionados excepto el NAT (número de sucesos sobre un umbral), el cual se realizó con el estándar ICAN AzB 08 y Software CadnaA v4.0.135. Los escenarios considerados para realizar estas simulaciones fueron los siguientes: operación del aeropuerto en condiciones normales, cierre 100% en un día de la pista norte y cierre 100% en un día de la pista sur. Y para las simulaciones de propagación de ruido ocasionado por las actividades realizadas en tierra se hicieron con el Software CadnaA v4.0.135. Los estándares que se utilizaron para calcular los indicadores  $L_d$ ,  $L_n$  y  $L_{dn}$  fueron ISO 9613-2 e ICAN AzB 08, considerando un solo escenario: operación del aeropuerto en condiciones normales.

## 5. Resultados

### 5.1. Simulación del ruido generado por las operaciones aéreas

En primer lugar se definieron los datos de entrada (al INM) para la simulación:

- Área de estudio (ver FIG. 6).
- Topografía del terreno.
- Pistas utilizadas.
- Rutas aéreas (ver FIG. 6).
- Relación de aeronaves.
- Perfiles de vuelo.
- Número de operaciones de vuelo promedio en el día y en la noche.
- Configuración de red y simulaciones de escenarios.

Los resultados para el indicador  $L_d$ , en condiciones normales de operación del aeropuerto, se muestran en la FIG. 6. La afección por ruido, en diferentes niveles, por parte de la población que habita en las zonas no industriales (mayoritariamente residencial) más próximas al aeropuerto se muestra en la FIG. 5.

FIG. 5/ **Personas expuestas, indicador  $L_d$  (condiciones normales de operación) en usos del suelo no industrial**

Afección	Personas	Viviendas	Área (ha)
<b>65-70 dB(A)</b>	70798	13882	292,2
<b>70-75 dB(A)</b>	5468	1072	24,1
<b>75-80 dB(A)</b>	112	22	0,4

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

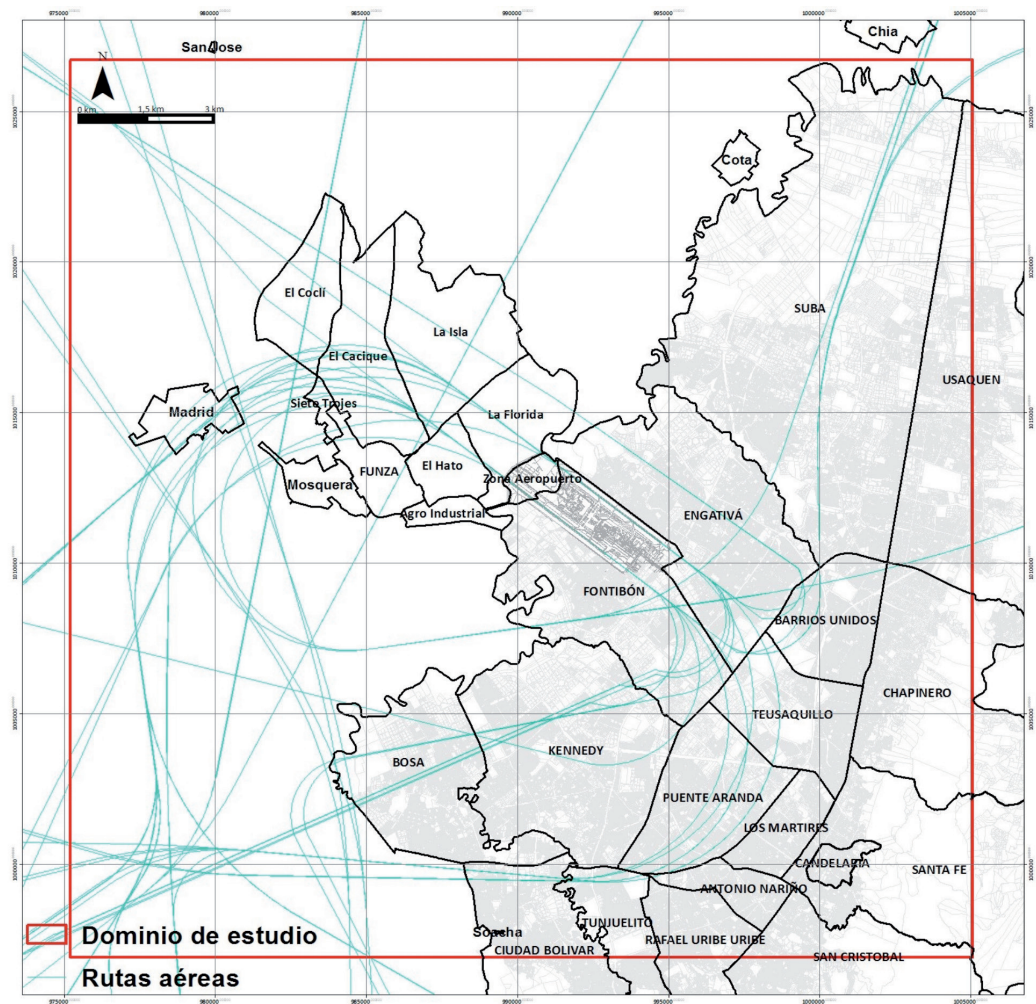


Fig. 6/ Área de estudio y rutas aéreas

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

Los resultados para el indicador Ln se muestran en la FIG. 8 para condiciones de operación normal. La afección por ruido, en diferentes niveles, por parte de la población que habita

en las zonas no industriales (mayoritariamente residencial) más próximas al aeropuerto se muestra en la FIG. 7.

Fig. 7/ Personas expuestas, indicador Ln (condiciones normales de operación) en usos del suelo no industrial

Afección	Personas	Viviendas	Área (ha)
55-60 dB(A)	120.693	23.665	870,8
60-65 dB(A)	61.536	12.066	274,4
65-70 dB(A)	18.691	3.665	72,5
70-75 dB(A)	1.754	344	6,4

Fuente: AEROCIVIL, 2014.



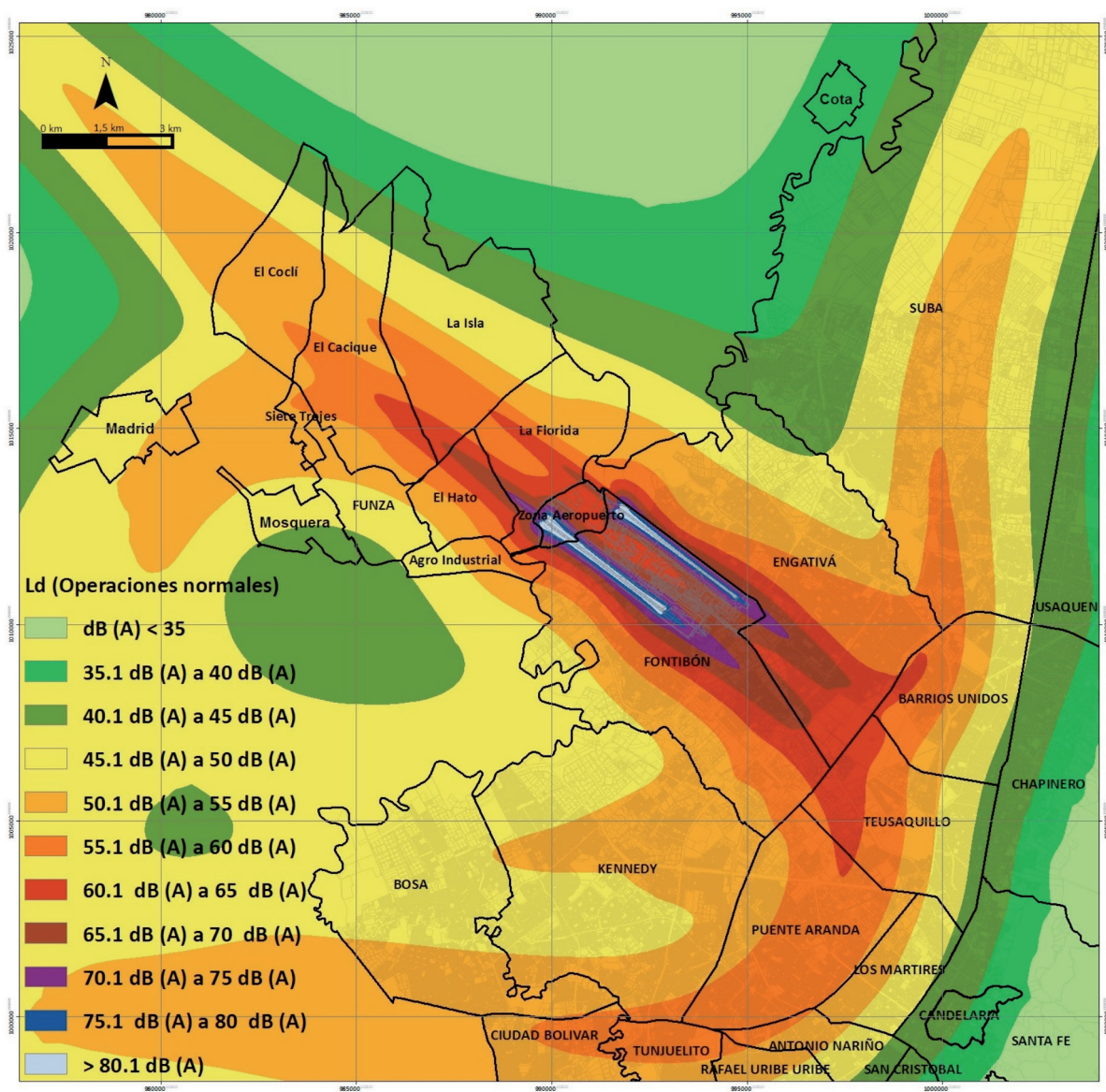


Fig. 8/ Indicador Ld para condiciones normales de operación

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

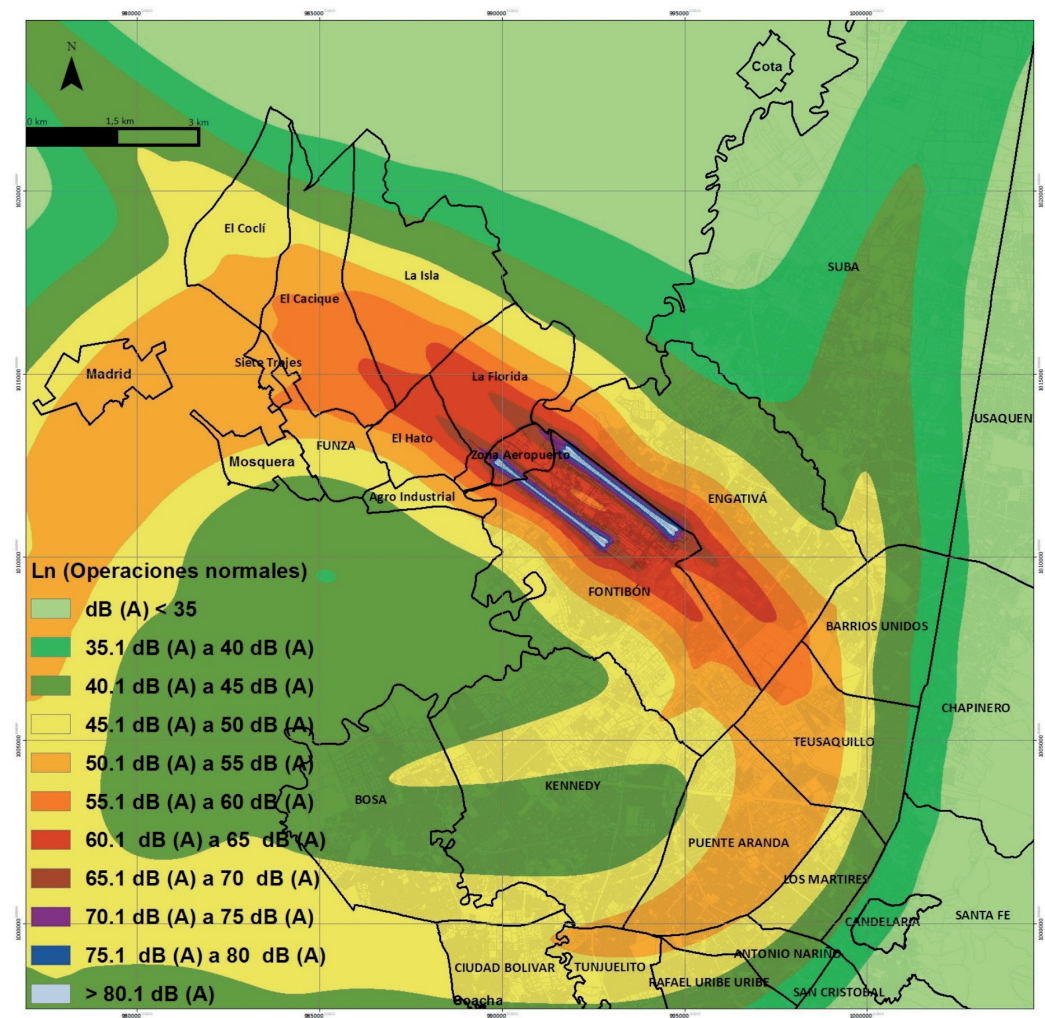


Fig. 9/ Indicador Ln (condiciones normales de operación)

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

En la FIG. 11 se presentan las isófonas que muestran el comportamiento acústico (para el indicador Ldn) bajo operaciones en condiciones normales. En la FIG. 12 se muestran las áreas anexas al aeropuerto expuestas dentro de niveles de presión sonora mayores o iguales a 65 dB(A), y en donde

queda mejor identificado el uso del suelo afectado por el ruido. Niveles mayores de 85 dB(A) no se presentan dentro de los usos de suelo tipo residencial. Y en la FIG. 10 se detalla la afección (personas, viviendas, áreas) según el indicador Ldn en usos del suelo no industrial.

Fig. 10/ Personas expuestas, indicador Ldn (condiciones normales de operación) en usos del suelo no industrial.

Afección	Personas	Viviendas	Área (ha)
65-70 dB(A)	105.731	20.732	591,5
70-75 dB(A)	34.715	6.807	143,5
75-80 dB(A)	7.004	1.373	24,5
80-85 dB(A)	5	1	0,03

Fuente: AEROCIVIL, 2014.



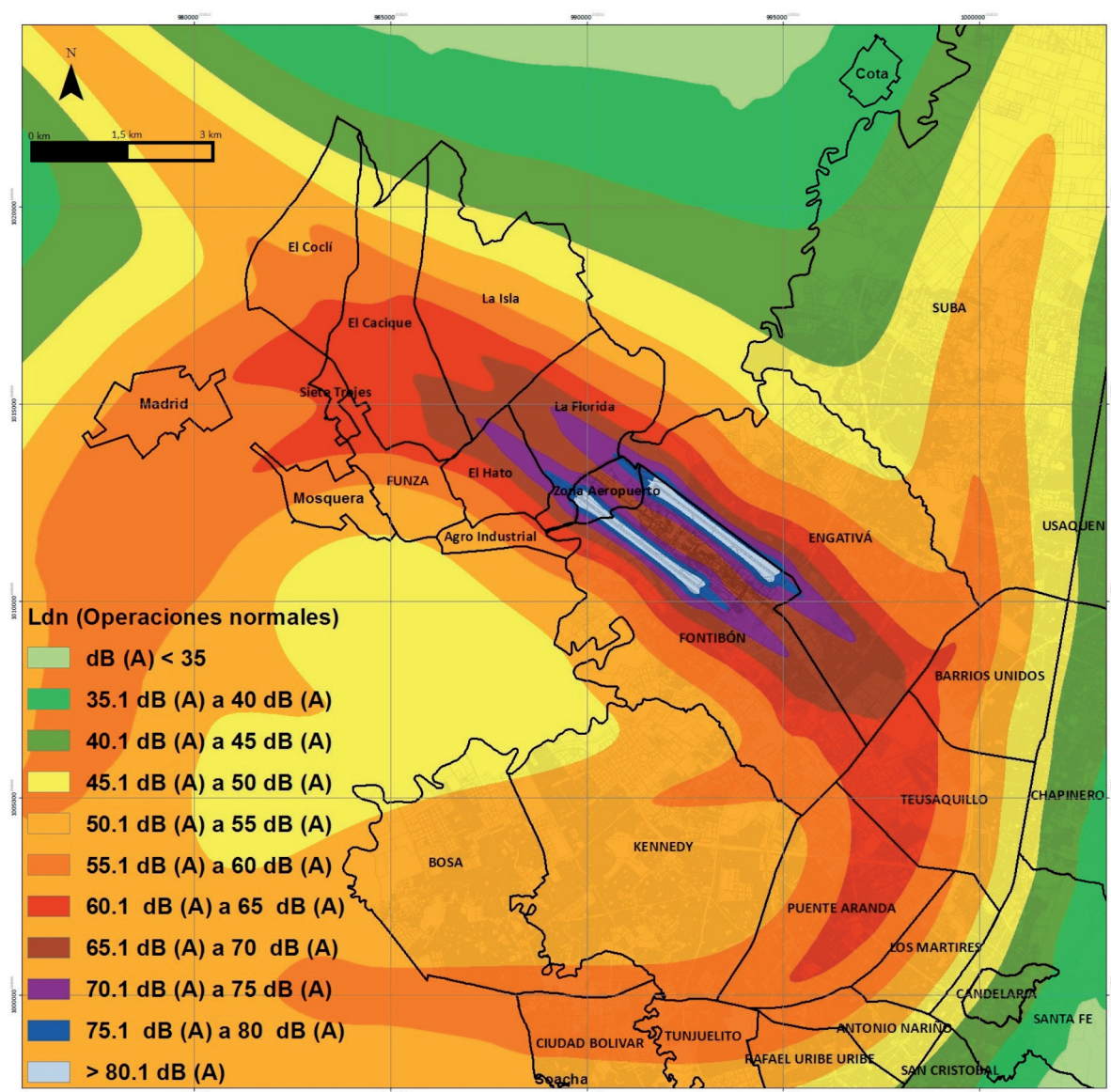


FIG. 11/ Indicador Ldn (condiciones normales de operación)

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

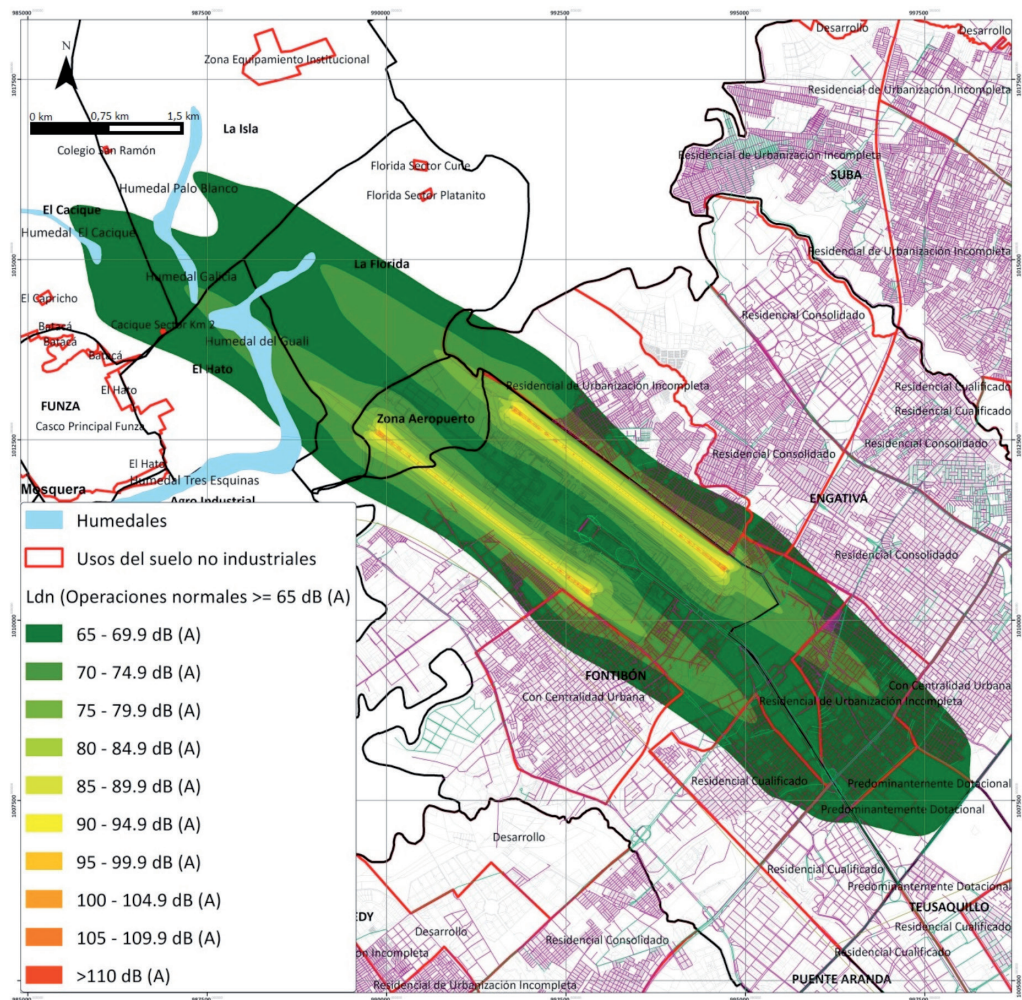


FIG. 12/ Uso del suelo de áreas afectadas según indicador Ldn

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

Teniendo en cuenta los siguientes criterios:  
a) resultados de modelaciones (curva de 65 Ldn); b) impactos generados por operaciones realizadas en tierra; y c) identificación de comunidades dentro de las rutas áreas donde las

alturas de los aviones generan niveles de ruido significativo, se define el área de influencia directa (AID) del estudio, que se presenta en la FIG. 13.



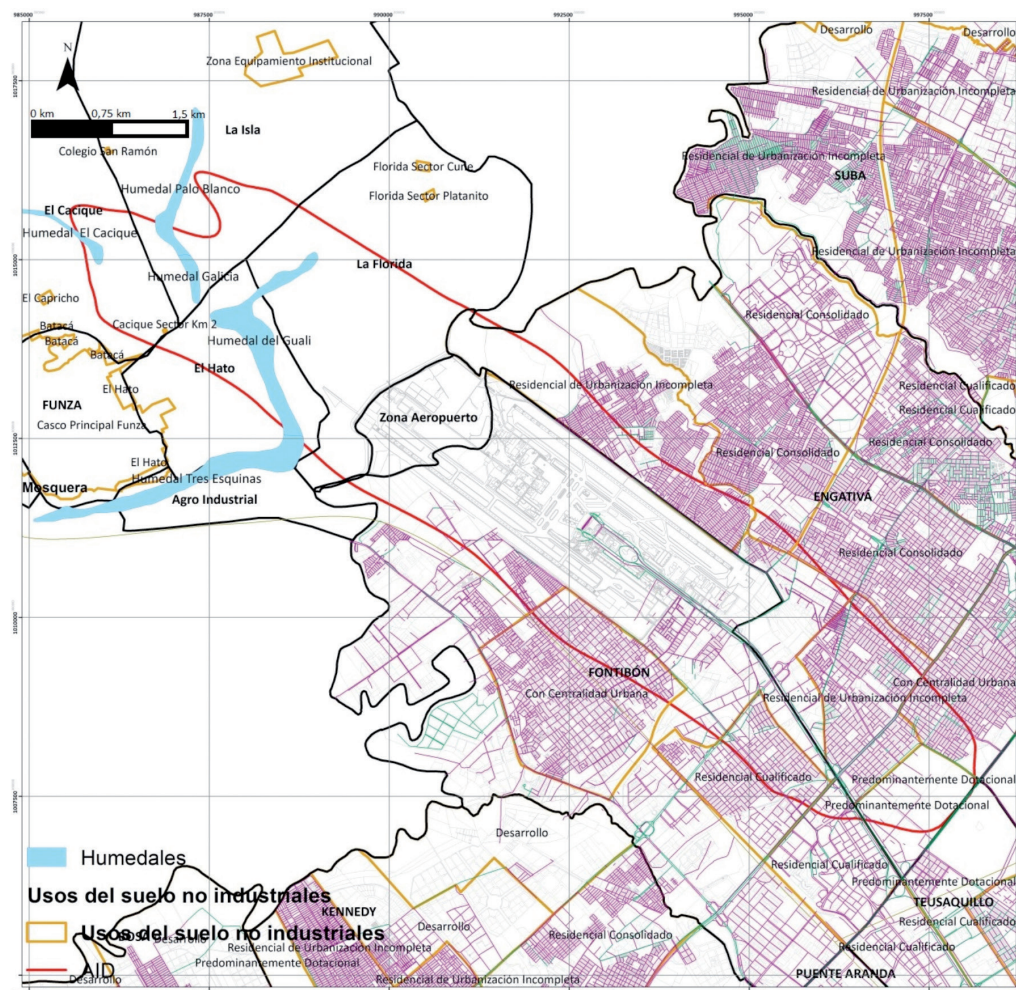


FIG. 13/ Área de Influencia Directa (AID) de aeropuerto en estudio

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

## 5.2. Análisis comparativo

En la FIG. 14 se presenta la comparación de las curvas de 65 dB(A) Ldn de los años 1998, 2003, 2004, 2008 con los resultados de los modelos del estudio aquí presentado (año 2014). Como se puede observar en la FIG. 15, que muestra cómo ha evolucionado la tendencia entre personas expuestas al rui-

do y las operaciones (diarias) del aeropuerto, entre el año 2002 y 2014 el número de personas expuestas se ha reducido un 40% cuando las operaciones (diarias) del aeropuerto han aumentado un 120% en el mismo periodo. Mientras, y en el mismo tiempo, la población de las localidades que rodean el aeropuerto ha aumentado aproximadamente un 180% (AEROCIVIL, 2014).

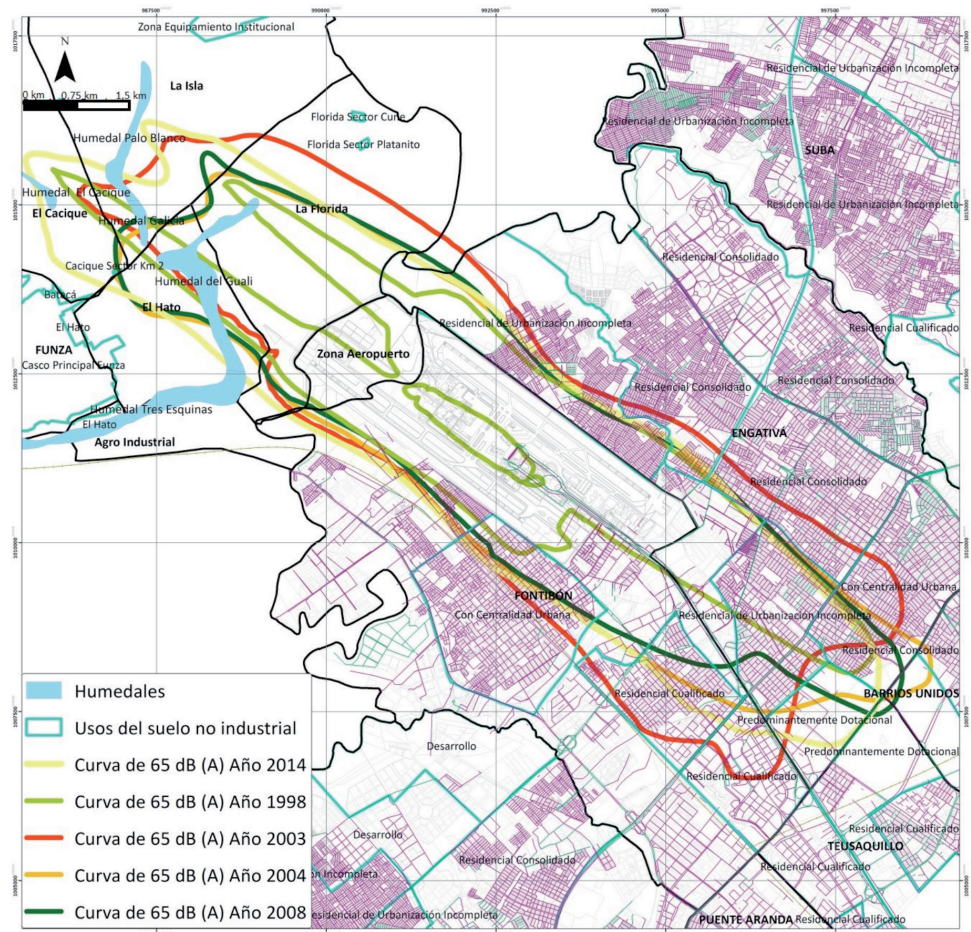


Fig. 14/ Comparativa de curvas 65 dB(A) entre el año de estudio (2014) y años anteriores

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

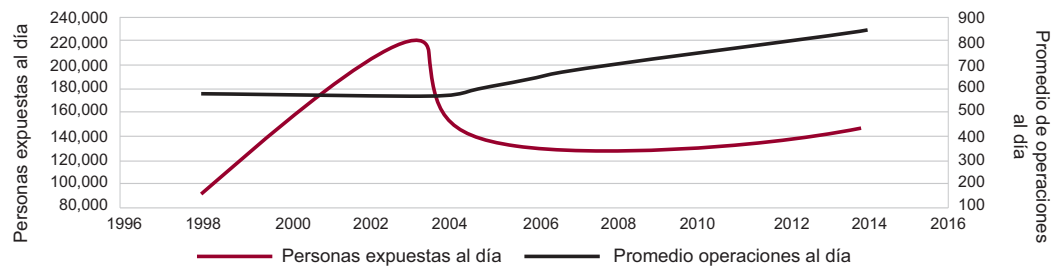


Fig. 15/ Evolución histórica de las personas expuestas y el promedio de operaciones al día en el aeropuerto

Fuente: AEROCIVIL, 2014.

## 6. Conclusiones

Basado en el concepto de «enfoque equilibrado» de la OACI la Autoridad de Aviación Civil de Colombia viene desarrollando e implementando para el Aeropuerto Internacional de Bo-

gotá-El Dorado una política medioambiental, en materia de mitigación del ruido, de forma ininterrumpida desde el año 1998. Los resultados de tales políticas son positivos en lo que respecta al número de personas expuestas a la polución acústica, cuyo número en la última dé-



cada ha descendido mientras aumenta la población de las zonas que rodean al aeropuerto, y donde también han crecido las operaciones (despegues y aterrizajes) en dicho aeropuerto.

El principal impacto ambiental generado por el aeropuerto en estudio no tiene como único origen el aeronáutico sino también (e incluso más crítico) el de la planificación y uso del suelo. La planificación de la utilización del terreno tiene un efecto directo sobre el número de personas afectadas por el ruido de los aviones por lo que las políticas apropiadas en relación al uso del suelo son fundamentales para mantener las reducciones de ruido ya logradas, en el aeropuerto en estudio, a través de la exigencia o autorización de utilizar en el aeropuerto sólo aeronaves más silenciosas, cambios importantes en los procedimientos de aproximación y despegue, y finalmente de las restricciones operacionales existentes durante casi dos décadas. Pero la Autoridad de Aviación Civil de Colombia no tiene competencias en la gestión del uso del suelo en las zonas anexas al aeropuerto en estudio. La única autoridad competente en gestión del uso del suelo en el entorno del aeropuerto es el Gobierno local de la ciudad de Bogotá (a través de los planes de ordenamiento territorial), pero dicha institución no tomó medidas para frenar y/o evitar una mayor expansión urbana entorno al aeropuerto, acaecida de forma ininterrumpida durante las últimas tres décadas; en este sentido la propia administración local reconoce que no existen normas claras ni tampoco decretos reglamentarios en el uso residencial e industrial en las zonas aledañas al aeropuerto (ALCALDÍA DE BOGOTÁ, 2018b). Es entonces en esta área principal del enfoque equilibrado de la OACI, «políticas de planificación y gestión de uso del suelo», en donde menos ha podido actuar e influir la Autoridad de Aviación Civil de Colombia para mitigar la contaminación acústica sobre los habitantes residentes en el entorno del aeropuerto.

Asimismo, esta situación de mitigación positiva del impacto del ruido en el aeropuerto en estudio ha motivado a la Autoridad de Aviación Civil de Colombia a solicitar a la Autoridad Ambiental de Colombia eliminar las actuales restricciones operacionales existentes en el aeropuerto debido al elevando aumento de la demanda que experimenta el aeropuerto y la prevista a corto y medio plazo (AEROCIVIL, 2017b; DÍAZ OLARIAGA, 2017b). La demanda pronosticada de tráfico aéreo para el aeropuerto en estudio es tan importante, y en el supuesto que las actuales restricciones operacionales continúen vigentes, que la autoridad colombiana en materia de infraestructuras (Agencia Nacional de Infraestructura-ANI)

ha puesto en marcha el diseño y construcción de un nuevo aeropuerto (AEROCIVIL, 2017b) a unos 15 km al oeste del actual aeropuerto de estudio y que operarán de forma simultánea.

## Bibliografía

- AEROCIVIL (2008): *Manual de atenuación de ruido de las aeronaves para el Aeropuerto Internacional El Dorado*. Bogotá D.C.: Aeronáutica Civil de Colombia.
- (2009): *El uso de suelos en áreas aledañas a aeropuertos*. Bogotá D.C.: Aeronáutica Civil de Colombia.
- (2014): *Estudio de impacto ambiental para la modificación de la licencia ambiental el Aeropuerto Internacional El Dorado de la Ciudad de Bogotá*. Bogotá D.C.: Aeronáutica Civil de Colombia.
- (2017): Estadísticas de Transporte Aéreo. <https://goo.gl/wmtr1K>
- (2017b): Planes Maestros. <https://goo.gl/iBNwxt>
- ALCALDÍA DE BOGOTÁ (2018a): Plan de Ordenamiento Territorial. <https://goo.gl/3RfZBo>
- (2018b): *Plan de Ordenamiento Territorial 2016*. <https://goo.gl/JRjQPS>
- ANI (2018): Agencia Nacional de Infraestructura. Aeropuertos. <https://goo.gl/6uEV2M>
- ARAFA, M. & al. (2007): «Noise assessment and mitigation schemes for Hurgada airport». *Applied Acoustics*, 68, 1373-1385.
- ASHFORD, N. & al. (2013): *Airport Operations*. New York: McGrawHill.
- BABISCH, W. (2006): «Transportation noise and cardiovascular risk: updated review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased». *Noise Health*, 8, 1-29.
- BRONZAFI, A.L. & al. (1998): «Aircraft noise: a potential health hazard». *Environment and Behaviour*, 30(1), 101-13.
- CHEN, T. & al. (1997): «Auditory effects of aircraft noise on people living near an airport». *Archives of Environmental Health*, 52, 45-50.
- CLARKE, J.P. (2003): «The role of advanced air traffic management in reducing the impact of aircraft noise and enabling aviation growth». *Journal of Air Transport Management*, 9, 161-165.
- COKORILLO, O. (2016): «Environmental issues for aircraft operations at airports». *Transportation Research Procedia*, 14, 3713-3720.
- DALEY, B. (2010): *Air Transport and the Environment*. Burlington: Ashgate.
- DANE (2018): Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://goo.gl/hwa94B>
- DE NEUFVILLE, R. & ODOMI, A. (2013): *Airport Systems, Planning, Design, and Management*. New York: McGraw Hill.
- DÍAZ OLARIAGA, O. (2010): «Soluciones de mercado al problema de la congestión aeroportuaria». *Estudios de Construcción y Transportes*, 113, 23-34.
- (2016): «Análisis de la evolución de las políticas públicas y de regulación en la industria aeroportuaria en Colombia». *Documentos y Aportes en Administración Pública y Gestión Estatal*, 26, 7-42.
- (2017a): «Políticas de privatización de aeropuertos. El caso de Colombia». *Documentos y Aportes en Administración Pública y Gestión Estatal*, 29, 7-35.



- (2017b): «Prognosis de tráfico aéreo. El caso del Aeropuerto Intl. de Bogotá (Colombia)». *Working Paper*. DOI: 10.13140/RG.2.2.31292.74882
- & ÁVILA, J. (2015): «Evolution of the airport and air transport industry in Colombia and its impact on the economy». *Journal of Airline and Airport Management*, 5(1), 39-66.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (2007): *INM User's Guide, Integrated Noise Model, INM 7.0, Technical Manual*. Washington DC: FAA.
- FRANSSSEN, E. & al. (2004): «Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use». *Occupational and Environmental Medicine*, 61, 405-413.
- FYHRI, A. & AASVANG, G. (2010): «Noise, sleep and poor health: modelling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems». *Science Total Environment*, 408(21), 4935-4942.
- GARCÍA, M. & GUILLAMÓN, J.M. (2004): *La gestión energética y medioambiental en las instalaciones aeroportuarias*. Madrid: Fundación AENA.
- GIRVIN, R. (2009): «Aircraft noise-abatement and mitigation strategies». *Journal of Air Transport Management*, 15(1), 14-22.
- GUILLAMÓN, J.M. (2010): *El aeropuerto y su entorno. Impactos ambientales y desarrollo sostenible*. Madrid: AENA.
- GREAVES, S. & COLLINS, A. (2007): «Disaggregate spatio-temporal assessments of population exposure to aircraft noise». *Journal of Air Transport Management*, 13(6), 338-347.
- HAINES, M. & al. (2002): «Multilevel modelling of aircraft noise on performance tests in schools around Heathrow Airport London». *Journal of Epidemiology and Community Health*, 56, 139-144.
- HEINONEN-GUZEJEV, M. & al. (2007): «The association of noise sensitivity with coronary heart and cardiovascular mortality among Finnish adults». *Science Total Environment*, 372(2-3), 406-412.
- HORONJEFF, R. & al. (2010): *Planning and Design of Airports*. New York: McGraw-Hill.
- IATA (2015): «La necesidad de revisar las restricciones existentes sobre el uso de la pista 13L/31R del Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá». *IATA Comments*.
- ICAO (2008): *Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management*. Montreal: ICAO.
- (2013): *Assembly Resolutions in Force. Doc 10022*. Montreal: ICAO.
- JANIC, M. (2007): *The Sustainability of Air Transportation: a Quantitative Analysis and Assessment*. Hampshire: Ashgate Publishing.
- (2011): *Greening Airports. Advanced Technology and Operations*. London: Springer.
- KAZDA, A. & CAVES, R. (2015): *Airport design and operations*. Bingley: Emerald.
- LICITRA, G. (2013): *Noise Mapping in the EU. Models and Procedures*. Boca Raton: CRC.
- & al. (2014): «Noise mitigation action plan of Pisa civil and military airport and its effects on people exposure». *Applied Acoustics*, 84, 25-36.
- LONDOÑO, J.L. & al. (2003): *Efectos auditivos y psicológicos del ruido producido por el tráfico aéreo del Aeropuerto El Dorado en las poblaciones de Engativá y Fontibón*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- MEISTER, E.A. & DONATELLE, R.J. (2000): «The impact of commercial-aircraft noise on human health: a neighborhood study in metropolitan Minnesota». *Journal of Environmental Health*, 63(4), 9-15.
- MEDEMA, H.M.E. (2007): «Annoyance caused by environmental noise: elements for evidence-based noise policies». *Journal of Social Issues*, 63, 41-57.
- MINAMBIENTE (2018): *Resolución 627 del 7 de Abril de 2006*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia).
- OACI (1999): *Manual-guía de protección ambiental para aeropuertos*. 1ª Edición. Montreal: OACI.
- (2002): *Modelo de planificación de aeropuertos. Parte 2: Utilización del terreno y control del medio ambiente*. Montreal: OACI.
- (2008): *Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Protección del Medio Ambiente. Volumen I. Ruido de las aeronaves*. 5ta edición. Montreal: OACI.
- OZKURT, N. & al. (2014): «Modeling of noise pollution and estimated human exposure around Istanbul Ataturk Airport in Turkey». *Science of the Total Environment*, 482-483, 486-492.
- & al. (2015): «Estimation of airport noise impacts on public health. A case study of Izmir Adnan Menderes Airport». *Transportation Research Part D*, 36, 152-159.
- POSTORINO, M. (2010): «Environmental effects of airport nodes: a methodological approach». *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 5(2), 192-204.
- & MANTECCHINI, L. (2016): «A systematic approach to assess the effectiveness of airport noise mitigation strategies». *Journal of Air Transport Management*, 50, 71-82.
- PRICE, J. & FORREST, J. (2016): *Practical Airport Operations, Safety, and Emergency Management*. Cambridge (MA): Elsevier.
- ROSENBLUND, M. & al. (2001): «Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise». *Occupational Environmental Medicine*, 58, 769-773.
- SADR, M.K. & al. (2014): «Assessment of land use compatibility and noise pollution at Imam Khomeini International Airport». *Journal of Air Transport Management*, 34, 49-56.
- SCATOLINI, F. & al. (2016): «Easing the concept «Balanced Approach» to airports with densely busy surroundings - The case of Congonhas Airport». *Applied Acoustics*, 105, 75-82.
- SCHRECKENBERG, D. & al. (2010): «Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 3382-3405.
- UPHAM, P. & al. (2003): *Towards Sustainable Aviation*. London: Earthscan.
- VISSER, H.G. (2005): «Generic and site-specific criteria in the optimization of noise abatement trajectories». *Transportation Research Part D*, 10, 405-419.
- & WIJNEN, R.A.A. (2001): «Optimization of Noise Abatement Departure Trajectories». *Journal of Aircraft*, 38(4), 620-627.
- VOGIATZIS, K. (2012): «Airport environmental noise mapping and land use management as an environmental protection action policy tool. The case of the Lamaka International Airport (Cyprus)». *Science of the Total Environment*, 424, 162-173.
- ZACHARY, D.S. & al. (2010): «Multi-impact optimization to reduce aviation noise and emissions». *Transportation Research Part D*, 15, 82-93.