

# AEROPUERTO VERDE, CONCEPTO Y MARCO GENERAL DE DESARROLLO

## GREEN AIRPORT, CONCEPT AND GENERAL DEVELOPMENT FRAMEWORK

## AEROPORTO VERDE, CONCEITO E QUADRO GERAL DE DESENVOLVIMENTO

### **Oscar Díaz-Olariaga**

Doctor Ingeniero Aeronáutico; Doctor en Economía y Administración de Empresas.  
Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Santo Tomás  
Bogotá, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-4858-3677>  
[oscardiazolariaga@usta.edu.co](mailto:oscardiazolariaga@usta.edu.co)



## RESUMEN

Los aeropuertos de todo el mundo están aumentando sus esfuerzos para reducir los impactos que generan en el medioambiente mediante la aplicación de sistemas de gestión ambiental. Esta línea de actuación de la industria aeroportuaria, que no lleva más de quince años, tiene el objetivo de transformar el aeropuerto en lo que se denomina 'aeropuerto verde'. Este se entiende como aquel aeropuerto que tanto su diseño como operación y administración se llevan a cabo de tal manera que su impacto ambiental es el mínimo posible, haciendo su gestión de carácter sostenible. Entonces, en el presente artículo se presenta un marco general de desarrollo del concepto, junto con un análisis de los procesos operativos de los aeropuertos que afectan negativamente al medio ambiente. A partir de lo anterior se sugieren políticas, estrategias y procesos de gestión que permitan minimizar o anular dichos efectos negativos en el entorno aeroportuario con el propósito de acercarlo hacia el concepto de 'aeropuerto verde'.

### Palabras clave

aeropuerto verde, gestión ambiental de aeropuertos, aeropuertos sustentables

## ABSTRACT

Airports around the world are increasing their efforts to reduce their environmental impacts by implementing environmental management systems. This line of action of the airport industry, which has been in place for no more than fifteen years, aims to transform the airport into what is called a "green airport." This is understood as an airport whose design, operation, and administration are carried out in such a way that its environmental impact is as low as possible, making its management sustainable. Therefore, this article presents a general framework for developing the concept, along with an analysis of airport operational processes that negatively affect the environment. Based on this, policies, strategies, and management processes are suggested that allow minimizing or canceling these adverse effects on the airport environment to bring it closer to the concept of a "green airport."

### Keywords

green airport, environmental management of airports, sustainable airports

## RESUMO

Os aeroportos de todo o mundo estão aumentando seus esforços para reduzir seus impactos ambientais por meio da implementação de sistemas de gestão ambiental. Essa linha de ação do setor aeroportuário, que está em vigor há não mais de quinze anos, tem por objetivo transformar o aeroporto no que é conhecido como "aeroporto verde". Ele é entendido como um aeroporto cujo projeto, operação e administração são realizados de forma que seu impacto ambiental seja o mínimo possível, tornando sua gestão sustentável. Portanto, este artigo apresenta uma estrutura geral para o desenvolvimento do conceito, bem como uma análise dos processos operacionais dos aeroportos que afetam negativamente o meio ambiente. Com base nisso, são sugeridas políticas, estratégias e processos de gerenciamento para minimizar ou cancelar esses efeitos negativos no ambiente do aeroporto, de modo a aproximá-lo do conceito de um "aeroporto verde".

### Palavras-chave:

aeroporto verde, gestão ambiental de aeroportos, aeroportos sustentáveis

## INTRODUCCIÓN

Los aeropuertos son uno de los pilares de la industria mundial de la aviación. Sin embargo, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero, no solo son grandes contribuyentes al cambio climático que el mundo experimenta actualmente (Postorino & Mantecchini, 2014), sino que también generan una amplia variedad de afectaciones ambientales que impactan tanto en el medio físico como a la salud de las comunidades que habitan en las proximidades de las terminales aéreas.

En la actualidad, la sostenibilidad ocupa un lugar central en los programas de desarrollo de aeropuertos, por lo que las crecientes preocupaciones ambientales demandan que el desarrollo y las operaciones de estos sean ecológicamente sustentables, para que el desarrollo de la aviación como industria sea sostenible (Kumar et al., 2020; Votsi et al., 2014). Asimismo, la demanda mundial de transporte aéreo está creciendo luego del intervalo impuesto por la pandemia del COVID-19 entre 2020 y 2021. Esto implica que los aeropuertos deberán crecer, en tanto ampliar su capacidad, para absorber la demanda prevista a mediano y largo plazo. Ahora bien, a pesar de la creencia común, no es la financiación o la disponibilidad de suelo lo que frena el crecimiento del aeropuerto, sino que son las consecuencias ambientales de la ampliación / expansión de sus infraestructuras las que plantean un desafío para su desarrollo (Ferrulli, 2016).

Lo anteriormente expuesto hace evidente que la sostenibilidad ambiental aeroportuaria es una preocupación emergente para el mundo (Korba et al., 2022). De acuerdo con esto, el *Airport Council International (ACI)* – organización internacional que reúne a todos los aeropuertos comerciales del mundo – define la sostenibilidad aeroportuaria como un enfoque holístico de la gestión de un aeropuerto para garantizar la integridad de la viabilidad económica, la eficiencia operativa, la conservación de los recursos naturales y la responsabilidad social del este (Airports Council International Europe, 2019). Por lo tanto, la sostenibilidad en los aeropuertos solo se puede lograr con el equilibrio correcto entre los objetivos socioeconómicos dentro de los límites impuestos por el entorno. Es precisamente esta idea la que fundamenta el objetivo del presente artículo, el cual es presentar, desde un punto de vista holístico, el concepto y principios de aeropuerto verde y el marco general de desarrollo que conlleva a la transformación de un aeropuerto en verde.

## METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se utilizó la metodología denominada mapeo sistemático, que es el proceso de identificar, categorizar y analizar la literatura existente que es relevante para un determinado tema de

investigación (Carrizo & Moller, 2018; Salama et al., 2017). El objetivo de esta revisión es mostrar una perspectiva general del campo científico relacionado, en este caso, el de los aeropuertos verdes. Este mapeo sistemático se desarrolla en tres bloques básicos: (a) en primer lugar, la definición para la búsqueda, en la cual se determina la pregunta de investigación, el alcance de la revisión, los criterios de inclusión / exclusión, y por último, la cadena de búsqueda; (b) luego se encuentra la ejecución de la búsqueda, y (c) en tercer lugar, el análisis y discusión de los resultados.

En lo que se refiere a la definición de la búsqueda, las preguntas de investigación son aquellas relacionadas con los fundamentos del concepto 'aeropuerto verde', a saber: ¿qué son o cómo se definen? ¿cuáles son sus criterios de desarrollo? ¿cómo se gestionan los indicadores relacionados? y finalmente ¿existe un modelo o estándar a seguir para transformar un aeropuerto en verde?

En cuanto al alcance de la revisión, esta se llevó a cabo fundamentalmente entre los años 2006-2023 (ambos inclusive). El argumento para ello es que durante el año 2006 se propone por primera vez el concepto de 'aeropuerto verde'. Sin embargo, también se tuvo en cuenta literatura científica previa que publicaba trabajos sobre 'aeropuertos ambientalmente sostenibles'.

La revisión se realizó mediante la búsqueda bibliográfica en los siguientes catálogos digitales: ScienceDirect, IEEE Xplore, Taylor & Francis, Springer, Wiley, SAGE y JSTOR, para la cual se utilizaron los siguientes descriptores: *green airport, environmentally sustainable airports, sustainable airport construction, sustainable air operations, airport environmental impact, airport environmental mitigation, airport and climate change, airport environmental management, green airport accreditation*.

Por su parte, en el proceso de filtrado de los estudios se aplicaron los siguientes criterios de inclusión / exclusión:

- (a) se incluyeron todas aquellas publicaciones científicas que solo tenían relación con el concepto de aeropuerto verde;
- (b) se incluyeron estudios editados en idioma inglés y español;
- (c) se incluyeron todos los estudios que proponían lineamientos y metodologías para la consecución de aeropuertos verdes;
- (d) se incluyeron casos de estudios, siempre y cuando aportaran un marco conceptual relacionado y con resultados concretos, medibles y comparables;
- (e) se excluyeron artículos sin diseño de investigación y sin una pregunta de investigación bien definida;
- (f) se excluyeron revisiones terciarias;
- (g) se excluyeron trabajos de revisión;
- (h) se excluyeron trabajos sobre encuestas de opinión o similar;
- (i) se excluyeron informes y/o estudios técnicos sin base

científica sólida;  
 (j) se excluyó toda 'literatura gris' que no presentara un fundamento teórico sólido, riguroso y formal.

Con respecto a la conducta de la búsqueda, se aplicaron dos filtros de revisión: (a) el primero fue la revisión del título del artículo y resumen; (b) y el segundo fue la revisión del texto completo del artículo.

Finalmente, el último paso a desarrollar de la metodología es presentar, contextualizar y analizar toda la literatura encontrada y seleccionada, exclusivamente de acuerdo con los criterios de desarrollo de un aeropuerto verde. Dicho análisis se realizó de forma segmentada por criterio a fin de definir la planificación, construcción, evolución y gestión de un aeropuerto verde. Estos criterios, a su vez, se discriminan por conceptos y/o indicadores que están directamente relacionados con los diferentes aspectos operativos y de gestión de un aeropuerto. Esta segmentación en el análisis es necesaria debido a la gran complejidad operativa que presentan los aeropuertos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### MAPEO TEMÁTICO

En primer lugar, y como resultado de la extensa revisión bibliográfica, se presenta un cuadro que sintetiza el mapeo temático y/o de conceptos que fue resultado de la revisión (Tabla 1). La descripción de los resultados, es decir, la categorización de los impactos ambientales y las correspondientes estrategias de mitigación, seguirá el patrón definido en la Tabla 1.

Tabla 1: Mapeo temático de la revisión de la bibliografía, segmentado por asociación entre impacto ambiental generado y estrategia desarrollada.  
 Fuente: Elaboración propia del Autor.

Estrategia ambiental (en función del impacto generado)	Referencias
Medidas de mitigación contra ruidos de vehículos de servicios y aviones.	Fyhri & Aasvang (2010); Meister & Donatelle, (2000); Babisch (2006); Haines et al. (2002); Heinonen-Guzejev et al. (2007); Díaz Olariaga (2018); ICAO (2013); ICAO (2022); Karakoc et al., (2019); Licitra & Ascari, (2014); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Reducción de emisiones, gestión de la calidad del aire, y eficiencia energética.	Halpern & Graham (2018); Young & Wells (2019); Budd & Ison (2017); Bamidele (2023); Karakoc et al., (2019); Čokorilo (2016); Monsalud et al., (2015); Postorino & Mantecchini (2014); ACA (2023); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Gestión del agua.	Guillamón (2010); Carvalho et al. (2013); Li et al., (2022); Young & Wells (2019); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Gestión de residuos.	Budd & Ison (2017); Guillamón (2010); Kumar et al., (2016); Baxter (2022); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Diseño y construcción sustentable.	Ferrulli (2016); Chang & Yeh (2016); Korba et al., (2022); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).
Gestión de procesos ambientales (varios tópicos / conceptos) y monitoreo.	Kumar et al., (2020); Budd & Ison (2017); Dimitriou & Karagkouni (2022); Young & Wells (2019); Ferrulli (2016); ACI Europe (2015); Kilkis & Kilkis (2016); Dalkiran (2022); ACI Europe (2019); ACI Europe (2015); ACRP (2013); ACI (2022); ACI (2021); ACI (2020); ACI (2019).

### DEFINICIÓN

El aeropuerto verde es aquel que ha sido diseñado y tanto su operación como su administración se ejecuta de tal manera que su impacto ambiental sea el mínimo posible para hacer su gestión de carácter sostenible (Airports Council International Europe, 2015; Ferrulli, 2016) , y cuya base tecnológica pretende asegurar que todos los recursos se utilizan y gestionan de la manera más eficiente posible para generar el menor impacto medioambiental. Para ello, el aeropuerto aplica sistemas inteligentes, colaborativos, dinámicos y automatizados capaces de responder a las necesidades cotidianas de todos sus grupos de interés.

En esta línea, un aeropuerto verde debe contemplar las siguientes actuaciones (Dalkiran et al., 2022; Kilkis & Kilkis, 2016):

- Explorar los distintos avances tecnológicos orientados a mejorar la eficiencia energética, para reducir los consumos.
- Favorecer la producción de energía con fuentes de energías renovables.
- Promover la colaboración en el desarrollo e implantación de estas medidas con los operadores y concesionarios del aeropuerto.
- Evaluar la viabilidad, eficacia y rentabilidad de estas tecnologías, así como de nuevos procedimientos operativos.
- Validar que la puesta en servicio de las diferentes actuaciones garantice la operatividad y la seguridad del aeropuerto.

Por lo tanto, y de acuerdo con lo anterior, se debe entender por aeropuerto verde aquella infraestructura aeroportuaria cuya gestión y operación está basada en criterios de sostenibilidad, lo que, según Airports Council International Europe (2015), Airports Council International Europe, (2019) y National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (Haseman, 2013) implica que:

- a. la organización tiene definida una política ambiental;
- b. dispone de un sistema de gestión ambiental acorde con su política ambiental;
- c. hace un uso eficiente de la energía disponible;
- d. utiliza fuentes de energías renovables en sus instalaciones;
- e. gestiona de manera eficiente sus residuos sólidos y los vertidos;
- f. hace un uso racional del agua y de otros recursos naturales;
- g. dispone de procedimientos que minimizan los impactos asociados a las operaciones;
- h. dispone de procedimientos para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero y de las emisiones contaminantes de ámbito local;
- i. promueve la utilización de buenas prácticas ambientales y cumple con la legislación medioambiental local<sup>1</sup>.

Puede observarse, entonces, que los criterios anteriores se centran en la implementación de tecnologías y metodologías técnicas que tienen como propósito la reducción de los impactos ambientales negativos de los aeropuertos<sup>2</sup>. Esta visión corresponde a uno de los discursos ambientales predominantes en la industria para la construcción de una política de sostenibilidad en la aviación, enfatizando en la modernización ecológica de los aeropuertos.

## IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR EL AEROPUERTO

La calidad ambiental en los alrededores de un aeropuerto puede verse afectada por múltiples impactos asociados a la actividad aeroportuaria. Por ello, es común segmentarlos de la siguiente manera, en relación con lo que se propone en Guillamón (2010), Young y Wells (2019); y Li et al. (2022):

- a) Impactos directos, los que resultan como consecuencia directa de la existencia del aeropuerto y su operación.

b) Impactos indirectos, los cuales se caracterizan por no estar directamente vinculados al aeropuerto, aunque tengan su desarrollo asociado a la existencia de este.

c) Impactos inducidos, que son aquellos generados como consecuencia de la existencia del aeropuerto, pero no por la acción directa de su instalación u operación.

A partir de lo anterior, se presenta el análisis centrado en los problemas ambientales relacionados con el aeropuerto y sus operaciones.

## RUIDO

El ruido generado por la aeronave, ya sea en sobrevuelo, durante el despegue y el aterrizaje o bien, al rodar sobre el campo de vuelo (pistas, calles de rodaje), es uno de los problemas ambientales más inmediatos y desafiantes de la industria aeroportuaria, ya que es uno de los factores que provoca la inmediata reacción de las comunidades vecinas al aeropuerto, debido a que es un problema que afecta la salud y el bienestar de los residentes en su área de influencia.

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, los que incluyen alteraciones y/o interrupción del sueño (Fyhri & Aasvang, 2010), aumento del estrés (Meister & Donatelle, 2000), hipertensión (Babisch, 2006), dificultades de lectura para niños y la pérdida de audición (Haines et al., 2002).

Otros estudios afirman que la sensibilidad al ruido puede ser un factor de riesgo para personas con problemas cardiovasculares (Heinonen-Guzejev et al., 2007). En definitiva, limitar o reducir el número de personas afectadas por el ruido es, hoy en día, una prioridad clave (Díaz Olariaga, 2018; Licitra & Ascari, 2014).

## CALIDAD DEL AIRE

Las emisiones de gases contaminantes como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO no provienen exclusivamente de las aeronaves, tanto en vuelo como en sus operaciones terrestres. Los medios de transporte que facilitan el acceso al aeropuerto, el consumo de energía (ya sea gas o electricidad) y los vehículos de servicio que respaldan la operatividad aeroportuaria, específicamente en el área conocida como 'lado aire', también son fuentes significativas de estos contaminantes. Estos elementos contribuyen de manera conjunta a la

**1** Se entiende aquí la legislación medioambiental local como todos los criterios y/o exigencias ambientales que, según el país, se deben cumplir para que un aeropuerto no sea penalizado en sus operaciones, o bien, un proyecto de ampliación o nuevo aeropuerto sea aprobado.

**2** A nivel de ejemplo o referencia en una subsección posterior, se presentan cifras sobre el impacto positivo en los indicadores ambientales resultados de las metodologías y estrategias implementadas por los gestores aeroportuarios.

degradación de la calidad del aire en las zonas aledañas al aeropuerto, como lo señalan Halpern y Graham (2018) y Young y Wells (2019).

A pesar de que la normativa sobre calidad del aire difiere entre países, los gestores aeroportuarios documentan y comunican las emisiones producidas, categorizándolas en las siguientes fuentes, según Budd y Ison (2017):

- a. Emisiones directas originadas de recursos que están bajo la propiedad o gestión del aeropuerto, incluidos los vehículos que operan en el lado aire o los edificios del aeropuerto;
- b. Emisiones indirectas asociadas principalmente con la adquisición de electricidad generada en otros lugares para su uso en las instalaciones aeroportuarias;
- c. Otras emisiones indirectas derivadas de las actividades del aeropuerto, que abarcan desde las operaciones de las aeronaves hasta los distintos medios de transporte que acceden al aeropuerto.

Las emisiones de tercer grupo (c) constituyen la mayor proporción del total de las emisiones en un aeropuerto, como indica Bamidele et al. (2023). Sin embargo, estas también son las emisiones sobre las cuales el operador aeroportuario, por lo general, ejerce poco o ningún control.

Existen principalmente dos fuentes de mala calidad del aire que han captado la atención de los operadores aeroportuarios: el acceso al aeropuerto por la vía terrestre y el servicio de vehículos de transporte en el lado aire del aeropuerto. En lo que respecta al primer tipo, es vital la cooperación de las autoridades locales para fomentar el uso del transporte público para llegar y desde el aeropuerto, y también para implementar el uso de energías renovables en sus sistemas de transporte público (Janić, 2018). Por su parte, sobre la segunda fuente de contaminación, cabe destacar que numerosos aeropuertos ya están utilizando, en el lado aire, vehículos de servicios impulsados eléctricamente.

### **EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

Tanto la planta de energía del aeropuerto, la flota de vehículos (de servicios), como el mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria, el equipo de apoyo en plataforma, el equipo de energía de emergencia, los sistemas de eliminación de residuos, etc., constituyen fuentes significativas de emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, los elementos que predominan en la generación de estos gases en un aeropuerto incluyen los equipos de climatización de los edificios, la iluminación interior y los servicios de asistencia a la aeronave en plataforma. Por otra parte, si bien representan una proporción menor, el balizamiento, la iluminación de la plataforma y los equipos de ayuda a la navegación aérea también contribuyen al coste total de la factura energética de un aeropuerto (Karakoc et al., 2019).

### **CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES**

La contaminación del agua puede ser resultado de una descarga directa o indirecta de sustancias en corrientes o cuerpos de agua, lo que provoca alteraciones en las propiedades de los ecosistemas naturales y la química del agua. Las aguas superficiales son las más vulnerables a la contaminación, dado que los contaminantes pueden ser arrastrados desde las superficies pavimentadas del aeropuerto (pistas, calles de rodaje y plataforma) hacia arroyos, ríos, humedales y lagos cercanos. El agua subterránea también puede verse afectada cuando las fugas o derrames de líquidos industriales se infiltran en el suelo (Guillamón, 2010; Santa et al., 2020).

### **GENERACIÓN DE RESIDUOS**

Los aeropuertos generan una serie de residuos, tanto peligrosos como no peligrosos, como resultado de sus variadas operaciones (Budd & Ison, 2017; Guillamón, 2010). Estos se pueden clasificar en:

- a. Residuos peligrosos derivados de las instalaciones de mantenimiento.
- b. Residuos (orgánicos e inorgánicos) producidos por los concesionarios del aeropuerto, como las tiendas.
- c. Residuos inorgánicos no necesariamente tóxicos generados por las oficinas administrativas del aeropuerto.
- d. Artículos confiscados en los controles de seguridad y en el equipaje facturado.
- e. Productos orgánicos, como alimentos diversos, confiscados en los controles de aduana.
- f. Residuos generados durante las operaciones de limpieza de las aeronaves.
- g. Residuos originados en la construcción y las obras civiles en el aeropuerto.
- h. Residuos industriales.
- i. Aguas residuales y aguas pluviales que han sido contaminadas.

### **ESTRATEGIAS DE GESTIÓN AMBIENTAL**

Además de proporcionar beneficios ambientales evidentes, las estrategias efectivas respaldadas por una serie de políticas públicas, programas y medidas, deberían permitir una mejor anticipación y resolución rápida de problemas ambientales, sin afectar el rendimiento económico o las oportunidades comerciales (Budd & Ison, 2017). En el caso específico de los aeropuertos, estas estrategias pueden focalizarse en mejorar la gestión ambiental, el monitoreo y las prácticas operacionales (Dimitriou & Karagkouni, 2022; Young & Wells, 2019).

## CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

La contaminación acústica es una de las principales fuentes de quejas y reclamos por parte de los residentes cercanos a los aeropuertos. Para reducir las emisiones sonoras de las principales operaciones, como los despegues y aterrizajes, los aeropuertos a nivel mundial han estado implementando gradualmente los criterios de 'enfoque equilibrado', promovidos por la *International Civil Aviation Organization* o ICAO (2014), según sus siglas en inglés. Este enfoque comprende cuatro elementos clave:

1. Reducción de ruido en la fuente.
2. Procedimientos operacionales para la atenuación del ruido.
3. Gestión y planificación de uso del suelo.
4. Introducción de restricciones operativas.

Para el primer elemento, la industria aeronáutica ha estado trabajando durante años en el diseño y construcción de motores más silenciosos, un área sobre la cual los aeropuertos no tienen competencias ni control (International Civil Aviation Organization, 2022; Karakoc et al., 2019).

El tercer elemento también escapa a la competencia y control del aeropuerto, ya que la gestión del uso del suelo en las proximidades del aeropuerto depende exclusivamente de las autoridades locales. Sin embargo, el aeropuerto sí tiene competencia y control sobre el segundo y cuarto elemento. En particular, introducir restricciones operativas, correspondientes al cuarto elemento, en la actualidad, es la táctica más aplicada en los aeropuertos más grandes del mundo (Licitra & Ascari, 2014).

## CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE

Desde que se reconocieron los efectos nocivos de los principales contaminantes atmosféricos producidos por las operaciones aeroportuarias, los gobiernos y las organizaciones internacionales han desarrollado regulaciones y programas dirigidos a minimizar su impacto negativo en la salud y el medio ambiente. Por lo tanto, es esencial que los programas de monitoreo se diseñen en cuanto a las siguientes condiciones (Čokorilo, 2016):

- a. En todo momento sea posible conocer de manera confiable e inmediata los valores de contaminación existentes, asegurándose de cumplir con los valores normalizados y acreditados correspondientes.
- b. Que permitan determinar los procesos de dispersión atmosférica de los contaminantes a través de una correcta ubicación de las estaciones de monitoreo.
- c. En caso de que los datos sean significativos, se permita controlar crisis puntuales de contaminación y analizar su evolución.

Simultáneamente, el aeropuerto puede mejorar la calidad del aire local mediante la aplicación de diferentes medidas en función de la fuente específica de los contaminantes (Greer et al., 2020; Karakoc et al., 2022).

## CONTROL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los aeropuertos, a fin de controlar las emisiones contaminantes, han comenzado a modernizar las plantas de energía, calefacción y enfriamiento para mejorar la eficiencia, al mismo tiempo que innovan al generar energía a partir de fuentes renovables. Del mismo modo, los edificios del aeropuerto se están diseñando (o rediseñando) para ser 'inteligentes' y eficientes en energía, lo que los sitúa a la par con ciertos estándares internacionales (Karakoc et al., 2019).

Si bien algunos aeropuertos ya han comenzado a trabajar en la 'eficiencia energética', esto aún no es un estándar en el diseño de la infraestructura aeroportuaria. Se entiende que la eficiencia energética corresponde a un conjunto de medidas inteligentes aplicadas a un entorno específico que permiten el ahorro de energía en cualquiera de sus formas, mientras se mantienen los niveles de calidad y servicio de los sistemas energéticos de dicho entorno sin comprometer los objetivos establecidos. El uso sostenible de la energía implica necesariamente la mejora de la eficiencia energética, lo que a su vez lleva a una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero (Monsalud et al., 2015). De este modo, de acuerdo con lo planteado por Postorino y Mantecchini (2014), la eficiencia energética en una infraestructura aeroportuaria deberá: a) garantizar la seguridad y operatividad del aeropuerto; b) contribuir al transporte de pasajeros y mercancías; y c) mejorar el rendimiento energético de los procesos que forman parte de su actividad.

En este sentido, los aeropuertos están cada vez más optando por la certificación del programa *Airport Carbon Accreditation* (ACA, 2023), que es el único programa global de certificación de gestión de carbono para aeropuertos respaldado institucionalmente por el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI). El ACA ofrece un marco común y una herramienta únicos para una gestión del carbono activo en los aeropuertos con resultados medibles, abarcando también las actividades operativas que más contribuyen a las emisiones de carbono.

El *Airport Carbon Accreditation* evalúa y reconoce los esfuerzos de los aeropuertos para gestionar y reducir sus emisiones de carbono a través de seis niveles de certificación o acreditación, las que se grafican en la Figura 1: 'mapeo' (medición de la huella de carbono), 'reducción' (gestión de la reducción de la huella de carbono), 'optimización' (participación de terceros en la reducción de la huella de carbono), 'neutralidad'

(neutralidad del carbono para las emisiones directas a través de compensaciones), 'transformación' (transformación de las operaciones aeroportuarias y las de sus socios comerciales para lograr reducciones absolutas de emisiones), y 'transición' (contrarrestar las emisiones residuales a través de compensaciones fiables) (ACA, 2023).

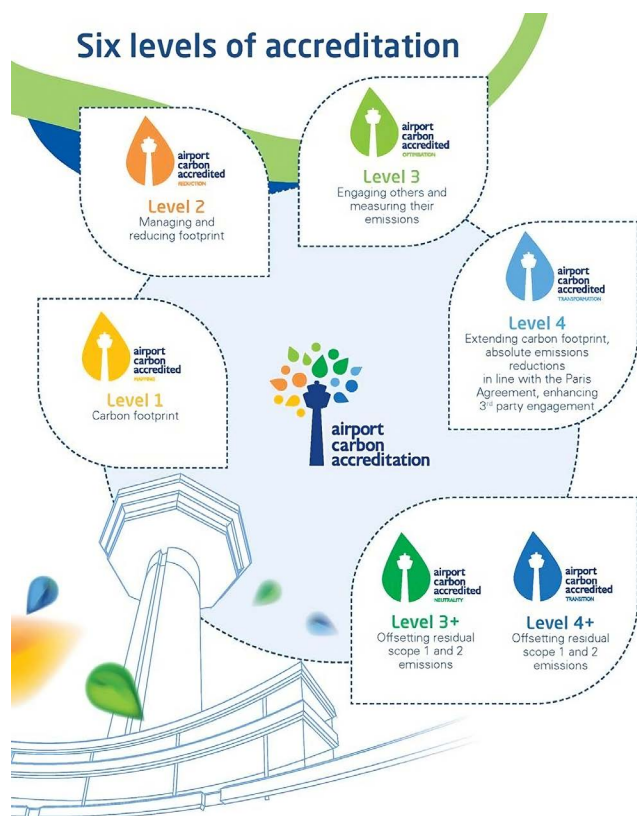


Figura 1: Niveles de acreditación de gestión de carbono para aeropuertos. Fuente: Airport Carbon Accreditation (<https://www.airportcarbonaccreditation.org/>)

## CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA

Los aeropuertos consumen cantidades significativas de agua en la prestación de servicios básicos a pasajeros, empleados, visitantes, y también a otras instalaciones, equipos e infraestructuras. Actualmente, el agua ya no se percibe como un recurso ilimitado y el costo de su suministro va en aumento, por lo que los aeropuertos están gestionando el consumo de agua a fin de reducir costos y como parte de su estrategia de desarrollo sostenible.

En términos de la gestión del recurso, existen dos enfoques clave para la conservación del agua potable: por un lado, reducir su uso y, por otro, sustituir el agua potable proveniente de la red por otras fuentes, como la recogida y reutilización del agua de lluvia, el tratamiento de aguas residuales y el reciclaje de aguas de refrigeración (Carvalho et al., 2013; Guillamón, 2010; Li et al., 2022; Young & Wells, 2019).

## GESTIÓN ÓPTIMA DE RESIDUOS

Baxter (2022) señala que la principal intención de los aeropuertos con respecto a las prácticas ambientales es reducir la generación de residuos, lo que resulta en una imagen positiva del aeropuerto ante a la sociedad. En este sentido, Guillamón (2010) evidencia que los aeropuertos han estado trabajando en tres niveles jerárquicos para la gestión eficiente de los residuos generados. El primero consiste en prevenir la generación de residuos a fin de evitar la producción innecesaria de estos. El segundo nivel corresponde a implementar políticas de reutilización y el tercer nivel refiere a establecer estrategias de reciclaje.

La gestión de residuos es uno de los problemas ambientales críticos que deben enfrentar en los aeropuertos a nivel mundial (Baxter et al., 2018). Los residuos sólidos y peligrosos producidos por los aeropuertos pueden ser procesados principalmente de tres formas: por reciclaje, por incineración y por disposición a vertedero. Gracias a la innovación, los residuos se están considerando cada vez más como un recurso para ser optimizado, minimizando así su impacto negativo sobre el medio ambiente.

El enfoque de la jerarquía de residuos se centra en su prevención, que es un pilar crucial en la economía verde y que contribuye a mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos y a reducir la necesidad de materias primas. Esta jerarquía comienza con la prevención y continúa con la reutilización, el reciclaje, la recuperación y, finalmente, la eliminación (Kumar et al., 2016).

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLES

El diseño y la construcción de las infraestructuras de un aeropuerto es un desafío para la ingeniería aeroportuaria contemporánea debido a la necesidad de tener en cuenta las preocupaciones ambientales (Ferrulli, 2016). Por esta razón, los aeropuertos deben desarrollarse de tal manera que la capacidad operativa y el desarrollo futuro no se vean afectados por limitaciones ambientales. Por otro lado, las autoridades aeroportuarias pueden implementar prácticas de construcción ecológica para hacer que los edificios aeroportuarios sean más ecológicos y respetuosos con el medio ambiente (Chang & Yeh, 2016).

## GESTIÓN DE PROCESOS AMBIENTALES Y MONITOREO

La presión pública, política y el endurecimiento de la legislación han propiciado que la industria aeroportuaria preste una mayor atención a la mitigación ambiental. A partir de esto, la gestión ambiental, el monitoreo y los procesos operativos se han integrado profundamente en las estrategias comerciales de la mayoría de los operadores aeroportuarios.



Tabla 2: Impacto de las estrategias ambientales del aeropuerto en los indicadores. Cifras de referencia en aeropuertos internacionales mediano-grandes (que gestionan entre 20 y 40 millones pasajeros/año), en los últimos cuatro años. Fuente: Airports Council International, 2022; Airports Council International, 2021 Airports Council International, 2020; Airports Council International, 2019.

Indicador	Acción / Estrategia	Reducción / Ahorro
Emisiones	Buses, y vehículos de servicio, eléctricos en lado aire	91% reducción de emisiones al año (342 T de CO <sub>2</sub> /año; 202 Kg de NOx/año)
Emisiones	Sistema avanzado de control de aire acondicionado en Terminal de pasajeros	Ahorro de 1,7 millones kWh/año, y 630 T de CO <sub>2</sub>
Emisiones	Utilización de luces LED en Terminal de pasajeros	32% reducción de emisiones CO <sub>2</sub> / año
Emisiones	Sistema limpio de calefacción y refrigeración geotérmica (para Terminal de pasajeros)	83% reducción de emisiones CO <sub>2</sub> / año
Emisiones	Utilización de luces LED en las pistas	Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> (para dos pistas): 712 T de CO <sub>2</sub> /año.
Emisiones	Equipos de apoyo en tierra a aeronaves con energía solar	Reducción anual de 102.209 litros de diésel, y de emisiones: NOx (1.672 kg); CO (965 kg); PM (190 kg).
Energía eléctrica	Implantación de programa de eficiencia energética (para todo el aeropuerto)	26% de reducción de consumo de electricidad al año
Calidad del aire	Instalación de estaciones de monitoreo continuo de la calidad del aire ambiente	12,5% de reducción anual de emisiones (incluidas las gaseosas y las partículas)
Calidad del aire	Implantación de un sistema gestión de la calidad del aire	Reducción de concentraciones (por año): SO <sub>2</sub> 49%, NOx 6,7%, NO <sub>2</sub> 11,7%, PM10 27,6%, PM2,5 26,3%
Calidad de aire	Plan de reducción de contaminantes del aire	Reducción anual: 10,1 T de TSP, 1,7 T de PM10, 1,2 T de PM2,5, 59,9 T de NOx, 36,1 T de SOx, 49,9 T de CO, y 12,5 T de hidrocarburos no metano.
Combustible de aviación	Rodaje de aeronaves en tierra con un solo motor	Ahorro de 4.382 kl de combustible / año
Agua	Implantación de un sistema de gestión del agua	30,92% de eficiencia en el uso del agua. 50% de la demanda de agua del aeropuerto se cubre con recursos internos como aguas residuales tratadas y aguas superficiales.
Agua	Sistema de reciclaje de aguas pluviales	Reducción el 50 % del total de agua de red utilizada dentro de Terminal de pasajeros.
Agua	Lavado en seco de aeronaves	Reducción del 90% de utilización agua.
Agua	Instalación de torres de enfriamiento de alta eficiencia	Reducción de 72.154 toneladas/año de consumo de agua en el Terminal de pasajeros.
Residuos	Sistema de minimización de residuos mediante compostaje y tratamiento de residuos orgánicos	Reducción anual de 238 T CO <sub>2</sub> , evitar el vertido de 353 MT/año de residuos de alimentos en vertederos, generar 276 MT de abono para paisajismo y horticultura.
Residuos	Sistema de gestión y reciclaje de residuos	Reducción general del 57 % en los residuos que van al vertedero.
Residuos	Sistema de separación de residuos y reciclaje	El 30,8% de los residuos generales se recicla. El 93,7% de los residuos a eliminar se utiliza como fuente de combustible derivado de residuos para la producción de cemento.

Del mismo modo, los sistemas de gestión ambiental se han adoptado ampliamente para proporcionar indicadores de referencia que garanticen respuestas coordinadas a una variedad de problemas ambientales. Es por ello que la implementación de regímenes de monitoreo confiables y replicables representa un componente vital tanto de las evaluaciones de impacto ambiental como de los sistemas de gestión ambiental (Kumar et al., 2020).

## IMPACTO DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN LOS INDICADORES

Durante al menos las dos últimas décadas, muchos aeropuertos en el mundo han comenzado a implementar acciones y estrategias para convertirse en infraestructuras ambientalmente sostenibles. Como se ha mencionado, los gestores aeroportuarios deben trabajar en varios ámbitos operativos, con planes a mediano y largo plazo que requieren inversiones de capital significativas para lograr mejoras considerables en los diferentes indicadores ambientales afectados por la actividad aeroportuaria. Para ilustrar el potencial de cómo los gestores aeroportuarios pueden impactar positivamente en los indicadores ambientales con sus acciones y estrategias, la Tabla 2 presenta estadísticas de experiencias recientes de varios aeropuertos internacionales de tamaño mediano y grande que gestionan anualmente de 20 a 40 millones de pasajeros en diferentes regiones del mundo.

## CONCLUSIONES

Los resultados de la extensa revisión temática del concepto 'aeropuerto verde' muestran elementos de convergencia entre los académicos en cuanto a la estructura o marco de desarrollo sobre el cual la gestión aeroportuaria debe basarse para fundamentar y lograr la sostenibilidad ambiental. La línea de acción planteada por la mayoría de los estudios e investigaciones comienza identificando los aspectos ambientales negativamente afectados por la actividad aeroportuaria. Luego, se identifica la fuente de los impactos ambientales y finalmente se formulan acciones, estrategias y métodos para mitigar o anular los impactos generados.

Un denominador común de la literatura analizada es la recomendación de que un aeropuerto sea ambientalmente sustentable o 'verde', los gestores aeroportuarios deben implementar prácticas ecológicas en sus competencias básicas debido a estrictas normas y regulaciones ambientales estrictas (exigidas en sus respectivos países). La creciente competencia ha llamado la atención de las autoridades aeroportuarias a nivel mundial para que adopten prácticas ecológicas en sus actividades organizativas y operativas.

En definitiva, los aeropuertos pueden verse limitados por cuestiones ambientales que restringen las operaciones actuales y acotan el crecimiento potencial futuro. Para maximizar las oportunidades de crecimiento es necesario considerar todos los factores involucrados en la construcción y operación de un aeropuerto para evitar afectaciones ambientales que impacten en las estrategias de sostenibilidad. El ciclo de vida y la planificación a largo plazo de infraestructuras aeroportuarias exigen un enfoque sistémico para satisfacer la necesidad de cambio mediante una mejor definición de procesos de gestión y cumplimiento de los requisitos de sostenibilidad ambiental.

**Contribución de autores:** Conceptualización, O.D.O.; Curación de datos; Análisis formal O.D.O.; Adquisición de financiación; Investigación, O.D.O.; Metodología, O.D.O.; Administración de proyecto, O.D.O.; Recursos; Software; Supervisión, O.D.O.; Validación, O.D.O.; Visualización; Escritura – borrador original, O.D.O.; Escritura – revisión y edición O.D.O.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRPORT CARBON ACCREDITATION. (2023, December 11). *Home - Airport carbon accreditation*. <http://www.airportcarbonaccreditation.org/>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2022). *Green Airports Recognition 2022: Carbon Management*. <https://www.aci-asiapac.aero/f/library/3198/Green%20Airports%20Recognition%202022%20-%20Carbon%20Management.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2021). *Green Airports Recognition 2021. Air Quality Management*. <https://www.aci-asiapac.aero/f/library/2186/Green%20Airports%20Recognition%202021%20-%20Air%20Quality%20Management.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2020). *Green Airports Recognition 2020. Water Management*. <https://www.aci-asiapac.aero/f/library/1367/GAR%202020%20Publication.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. (2019). *Green Airports Recognition 2019. Green Airport Infrastructure*. [https://www.aci-asiapac.aero/f/library/1368/GAR\\_2019\\_Publication.pdf](https://www.aci-asiapac.aero/f/library/1368/GAR_2019_Publication.pdf)

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL EUROPE (2019). *Sustainability strategy for airports*. <https://www.aci-europe.org/downloads/resources/aci%20europe%20sustainability%20strategy%20for%20airports.pdf>

AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL EUROPE (2015). *Green Airports. ICAO Intl. Aviation and Environment Seminar, Warsaw, 19 March 2015*. [https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2015-Warsaw/8\\_2\\_Green%20Airports-ACI-Europe.pdf](https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2015-Warsaw/8_2_Green%20Airports-ACI-Europe.pdf)

Babisch, W. (2006). *Transportation noise and cardiovascular*

risk: Updated Review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased. *Noise & Health*, 8(30), 1. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.32464>

Bamidele, R. O., Öztüren, A., Haktanir, M., & Ogunmokun, O. A. (2023). Realizing Green Airport Performance through Green Management Intransigence, Airport Reputation, Biospheric Value, and Eco-Design. *Sustainability*, 15(3), 2475. <https://doi.org/10.3390/su15032475>

Baxter, G., Srisaeng, P., & Wild, G. (2018). Sustainable airport waste management: The case of Kansai International Airport. *Recycling*, 3(1), 6. <https://doi.org/10.3390/recycling3010006>

Baxter, G. (2022). Towards sustainable airport waste management through the adoption of a “green” airport strategy: The case of Incheon International Airport. *Clean Technologies and Recycling*, 2(4), 247–278. <https://doi.org/10.3934/ctr.2022013>

Budd, L., & Ison, S. (2017). *Air Transport Management: An International Perspective*. Routledge.

Carrizo, D., & Moller, C. (2018). Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas de literatura en Ingeniería de Software: un estudio de mapeo sistemático. *Ingeniare. Revista Chilena De Ingeniería*, 26, 45–54. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000500045>

Carvalho, I., Calijuri, M. L., Assemany, P. P., Silva, M. D. F. M. E., Neto, R. F. M., Da Fonseca Santiago, A., & De Souza, M. H. B. (2013). Sustainable airport environments: A review of water conservation practices in airports. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.016>

Chang, Y. H., & Yeh, C. (2016). Managing corporate social responsibility strategies of airports: The case of Taiwan’s Taoyuan International Airport Corporation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 92, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.06.015>

Čokorilo, O. (2016). Environmental issues for aircraft operations at airports. *Transportation Research Procedia*, 14, 3713–3720. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.491>

Dalkiran, A., Ayar, M., Kale, U., Nagy, A., & Karakoç, T. H. (2022). A review on thematic and chronological framework of impact assessment for green airports. *International Journal of Green Energy*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/15435075.2022.2045298>

Díaz Olariaga, O. (2018). Análisis de mitigación de ruido aeroportuario. El caso del Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado (Colombia). *Ciudad y Territorio*, 197, 557-576. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/76682/46998>

Dimitriou, D. & Karagkouni, A. (2022). Airports’ Sustainability Strategy: Evaluation Framework Upon Environmental Awareness. *Frontiers in Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.880718>

Fyhri, A. & Aasvang, G. (2010). Noise, sleep and poor health: modelling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems. *Science of the Total Environment*, 408(21), 4935–4942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.057>

Ferrulli, P. (2016). Green Airport Design Evaluation (GrADE) – methods and tools improving infrastructure planning. *Transportation Research Procedia*, 14, 3781-3790. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.463>

Greer, F., Rakas, J. & Horvath, A. (2020). Airports and environmental sustainability: a comprehensive review. *Environmental Research Letters*, 15(10), 103007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb42a>

Guillamón, J.M. (2010). *El aeropuerto y su entorno. impactos ambientales y desarrollo sostenible*. AENA.

Haines, M., Stansfeld, S., Head, J. & Job, R. (2002). Multilevel modelling of aircraft noise on performance tests in schools around Heathrow Airport London. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 56(2), 139–144. <https://doi.org/10.1136/jech.56.2.139>

Halpern, N. & Graham, A. (2018). *The Routledge companion to air transport management*. Routledge.

HASEMAN, Z. (2013). Integrating Environmental Sustainability into Airport Contracts. In *Transportation Research Board eBooks*. <https://doi.org/10.17226/22567>

Heinonen-Guzejev, M., Vuorinen, H. S., Mussalo-Rauhamaa, H., Heikkilä, K., Koskenvuo, M., & Kaprio, J. (2007). The association of noise sensitivity with coronary heart and cardiovascular mortality among Finnish adults. *Science of the Total Environment*, 372(2–3), 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.08.048>

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. (2014). *Assembly Resolutions in Force (as of 4 October 2013)*. Doc 10022. ICAO. [https://www.icao.int/sustainability/Documents/A38-Res\\_10022\\_en.pdf](https://www.icao.int/sustainability/Documents/A38-Res_10022_en.pdf)

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. (2022). *2022 Environmental Report*. ICAO. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2022.aspx>

Janić, M. (2018). *Landside accessibility of airports: Analysis, Modelling, Planning, and Design*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76150-3>

Karakoc, T., Colpan, C., Altuntas, O. & Sohret, Y. (2019). *Sustainable aviation*. Springer.

Karakoc, T., Colpan, C. & Dalkiran, A. (2022). *Progress in Sustainable Aviation*. Springer.

Kilkis, S. & Kilkis, S. (2016). Benchmarking airports based on a sustainability ranking index. *Journal of Cleaner Production*, 130, 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.031>

Korba, P., Koščáková, M., Fözö, L., & Sekelová, I. (2022). Current State and Possible Challenges in the Development of Green Airports. *2022 New Trends in Civil Aviation*. <https://doi.org/10.23919/ntca55899.2022.9934733>

Kumar, A., Aswin, A., & Gupta, H. (2020). Evaluating green performance of the airports using hybrid BWM and VIKOR methodology. *Tourism Management*, 76, 103941. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2019.06.016>

Kumar, A., Dixit, G., & Prabhakar, D. (2016). Analyzing the factors affecting the Sustainable Municipal Solid Waste Management (MSWM). *Indian journal of science and technology*, 9(1), 1-7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/105286>

Li, X., Chen, X. & Liu, Z. (2022). Research on construction and development of green airport. *Advances in economics, business and management research*. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.220502.077>

Licitra, G. & Ascari, E. (2014). G den: An indicator for European noise maps comparison and to support action plans. *The Science of the Total Environment*, 482-483, 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.014>

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. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=HRCA&u=anon~cb41f220&id=GALEIA67882799&v=2.1&it=r&sid=googleScholar&asid=ad58d236>

Monsalud, A., Ho, D. & Rakas, J. (2015). Greenhouse gas emissions mitigation strategies within the airport sustainability evaluation process. *Sustainable Cities and Society*, 14, 414-424. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.003>

Postorino, M. & Mantecchini, L. (2014). A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions. *Journal of Air Transport Management*, 37, 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.03.001>

Salama, M., Bahsoon, R. & Bencomo, N. (2017). Managing Trade-offs in Self-Adaptive Software Architectures: A Systematic Mapping Study. En *Managing Trade-offs in Adaptable Software Architectures* (pp. 249-297). Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802855-1.00011-3>

Santa, S. L. B., Ribeiro, J. M. P., Mazon, G., Schneider, J., Barcelos, R. L., & De Andrade Guerra, J. B. S. O. (2020). A Green Airport model: proposition based on social and environmental management systems. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102160. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102160>

Votsi, N., Mazaris, A., Kallimanis, A. & Pantis, J. (2014). Natural quiet: An additional feature reflecting green tourism development in conservation areas of Greece. *Tourism Management Perspectives*, 11, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2014.02.001>

Young, S., & Wells, A. T. (2019). *Airport Planning & Management, Seventh Edition*. McGraw Hill Professional.