

**ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA  
LOGÍSTICA AEROPORTUARIA**

**ANDREA CAROLINA CASTELLANOS MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA  
LOGÍSTICA AEROPORTUARIA**

**ANDREA CAROLINA CASTELLANOS MUÑOZ**

**Trabajo de gradopresentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniera Industrial**

**Director**

**JAVIER EDUARDO ARIAS OSORIO**

**Ingeniero Industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA**

**2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.*

*A mi familia por ser el apoyo incondicional en cada uno de mis retos.*

*A mi noni, por el amor que me ha dado y por su apoyo incondicional en mi vida.*

*A mi novio, por su paciencia y comprensión, por su bondad y sacrificio que me inspira a ser mejor. Gracias por estar siempre a mi lado.*

*A mi director de tesis Ing. Javier E. Arias por su experiencia, sus conocimientos y apoyarme en el desarrollo de este trabajo.*

*Gracias a todos lo que no están aquí, pero que ayudaron a que este gran esfuerzo se volviera realidad.*

**Andrea Carolina Castellanos Muñoz**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. OBJETIVOS	22
4. MARCO TEÓRICO	23
4.1 ESTADO DEL ARTE	23
4.2 LOGÍSTICA	27
4.3 LOGÍSTICA AEROPORTUARIA	29
4.3.1 Operación aeropuerto.	33
4.3.2 Planeación de la aerolínea.	36
4.3.3 Transporte aéreo de carga.	39
4.3.4 Manejo de equipaje.	42
4.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN	43
5. DESARROLLO METODOLÓGICO	46
5.1 FASE PRIMARIA	46
5.2 REVISIÓN DOCUMENTAL	48
5.2.1 Referentes teóricos.	48
5.3 DESARROLLO DE LAS FASES DEL ESTADO DEL ARTE	49
5.3.1 Fase Heurística.	50
5.3.2 Fase Hermenéutica.	52
5.3.3 Fase de Conclusión.	57

<b>6. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>58</b>
<b>6.1 MODELO: PROBLEMA DE GESTION DEL FLUJO DE TRÁFICO AÉREO EN EUROPA</b>	<b>58</b>
6.1.1 El modelo matemático EU ATFM.	58
6.1.2 Características de las soluciones para EU ATFM.	61
6.1.3 Hallazgos e implicaciones.	64
<b>6.2 MODELO: MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE COLABORACIÓN PARA EL RODAJE EN TIERRA BASADO EN LA PRIORIDAD DE LAS AERONAVES</b>	<b>64</b>
6.2.1 Cola Virtual de Colaboración.	69
6.2.1.1 Periodo de tiempo.	69
6.2.1.2 Secuencia de las operaciones.	71
6.2.1.3 Decisiones y apoyo.	72
6.2.1.4 Aerolíneas.	73
6.2.1.5 Gestión de rendimiento del Aeropuerto.	74
<b>6.3 MODELO: <i>HUB AND SPOKE</i></b>	<b>75</b>
6.3.1 Clases del Modelo.	75
6.3.1.1 Modelo de aporte y dispersión simple.	76
6.3.1.2 Modelo de doble aporte o dispersión.	76
6.3.1.3 Modelo de aporte y dispersión puro o por oleadas.	77
6.3.2 Problemáticas de aplicación.	77
<b>6.4 MODELO: ALGORITMO SECUENCIAL DE AEROPUERTO CON MOVIMIENTO TERRESTRE (O EN TIERRA)</b>	<b>77</b>
6.4.1 Algoritmo secuencial de movimiento en tierra.	78
6.4.2 Enfoques para mejorar la calidad de la solución.	79
6.4.3 Resultados para el Aeropuerto de Zúrich y conclusiones.	80
<b>6.5 MODELO: OPTIMIZACION DEL FLUJO DEL TRAFICO AEREO</b>	<b>81</b>
6.5.1 El Modelo Matemático.	84
6.5.2 Especificaciones del modelo.	86
6.5.2.1 Restricciones.	86
6.5.2.2 Desigualdades.	87
<b>6.6 MODELO: DESPLAZAMIENTO TERRESTRE PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS ESTIMACIONES DE TIEMPO DE RODAJE EN LOS AEROPUERTOS</b>	<b>88</b>
6.6.1 Descripción del problema.	91
6.6.1.1 El problema del desplazamiento terrestre en el aeropuerto.	91

6.6.1.2 Cálculo de la velocidad de rodaje.	92
6.6.1.3 Interpretación del modelo.	95
6.7 MODELO: <i>TURN – AROUND</i> (TIEMPO DE VUELTA)	96
6.7.1 <i>Turn around</i> en servicios.	96
6.7.2 Simulación del modelo.	100
7. LATINOAMERICA	102
7.1 MODELO: <i>HUB AND SPOKE</i>	102
7.2 LA INTEGRACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN Y LA SIMULACIÓN, PARA OBTENER UNA LOGÍSTICA AEROPORTUARIA MÁS EFICIENTE EN LATINOAMERICA	103
8. CONCLUSIONES	106
9. RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	117

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Campos a incluir en la búsqueda de publicaciones	51
<b>Tabla 2.</b> Ecuación de búsqueda	54

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Retos de la gestión de los recursos e iniciativas del ATS	30
<b>Figura 2.</b> Áreas de la logística aeroportuaria	32
<b>Figura 3.</b> Diagrama general del proyecto	47
<b>Figura 4.</b> Instancias del problema <i>EU ATFM</i>	61
<b>Figura 5.</b> Demanda de aterrizajes en MXP (7:30 - 10:30 am Hora Local)	63
<b>Figura 6.</b> Concepto de CVQ	70
<b>Figura 7.</b> Explicación del nuevo modelo de flujo de tráfico aéreo	85
<b>Figura 8.</b> Distribución de tierra del aeropuerto de Estocolmo-Arlanda	94

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> Herramienta de búsqueda y procesamiento	118
<b>ANEXO B.</b> Numero de publicaciones por ecuaciones de búsqueda	122
<b>ANEXO C.</b> Actualización del análisis bibliométrico de publicaciones	124
<b>ANEXO D.</b> Matrices de correlación	142
<b>ANEXO E.</b> Palabras clave asociadas a las líneas de investigación	146
<b>ANEXO F.</b> Ecuación de búsqueda	151
<b>ANEXO G.</b> Análisis bibliométrico	152
<b>ANEXO H.</b> Palabras clave por línea estratégica	161

## GLOSARIO

**AERÓDROMO:** Es toda área delimitada, terrestre o acuática habilitada por la autoridad aeronáutica y destinada a la llegada, salida y maniobra de aeronaves en la superficie.

**AEROPUERTO:** Aeródromo público que se encuentra habilitado para la salida y llegada de aeronaves en vuelos internacionales.

**AEROVIA:** Área de control o parte de ella dispuesta en forma de corredor.

**AREA DE ATERRIZAJE:** Parte del área de movimiento destinada al aterrizaje o despegue de aeronaves.

**AREA DE CONTROL (CTA):** Espacio aéreo controlado que se extiende hacia arriba desde un límite especificado sobre el terreno.

**AREA DE CONTROL TERMINAL (TMA):** Área de control establecida generalmente en la confluencia de rutas ATS en las inmediaciones de uno o más aeródromos principales.

**CALLE DE RODAJE:** Vía definida en un aeródromo terrestre, establecida para el rodaje de aeronaves y destinada a proporcionar enlace entre una y otra parte del aeródromo.

**CENTRO DE CONTROL DE AREA (ACC):** Dependencia establecida para facilitar servicio de control de tránsito aéreo a los vuelos controlados en las áreas de control bajo su jurisdicción.

**CONTROLADOR DE TRANSITO AEREO HABILITADO:** Persona especializada en control de tránsito aéreo, titular de licencia y de habilitaciones válidas, apropiadas para el ejercicio de sus atribuciones.

**ESPACIO AEREO CONTROLADO:** Espacio aéreo de dimensiones definidas dentro del cual se facilita servicio de control de tránsito aéreo, de conformidad con la clasificación del espacio aéreo.

**HUB:** Centro de conexión y distribución de vuelos de una compañía aérea

**LAISSEZ FAIRE:** Expresión francesa “dejen hacer, dejen pasar” refiriéndose a una completa libertad en la economía: libre mercado, libre manufactura, bajos/nulos impuestos y mínima intervención de los gobiernos.

**PISTA:** Área rectangular definida en un aeródromo terrestre preparada para el aterrizaje y el despegue de las aeronaves.

**PISTA PRINCIPAL:** Pista que se utiliza con preferencia a otras, siempre que las condiciones lo permita.

**PLAN DE VUELO:** Información especificada que, respecto a un vuelo proyectado o a parte de un vuelo de una aeronave, se somete a las dependencias de los servicios de tránsito aéreo.

**PLATAFORMA:** Área definida, en un aeródromo terrestre, destinado a dar cabida a las aeronaves para los fines de embarque o desembarque de pasajeros, correo o carga, abastecimiento de combustible, estacionamiento o mantenimiento.

**PUSH BACK:** Procedimiento por el cual un avión es remolcado desde la puerta de embarque, hasta la calle de rodaje.

**RETROCEDER:** Empuje inverso que realiza el avión para efectuar el movimiento de “marcha hacia atrás”.

**RETROTRACCIÓN:** Fingimiento que consiste en suponer que una acción se ejecutó en un tiempo anterior a aquel en el que realmente tuvo lugar.

**TAXI:** Movimiento por el suelo antes del despeje o antes del aterrizaje. Rodaje

**TAXI-OUT:** Se refiere al período de tiempo comprendido cuando un avión sale de la puerta y cuando se quita.

**TIEMPO DE VUELO (Aviones):** Tiempo total transcurrido desde que la aeronave comienza a moverse por su propia fuerza con el objeto de despegar, hasta que se detiene al finalizar el vuelo.

**TORRE DE CONTROL DEL AERODROMO (TWR):** Dependencia establecida para facilitar servicios de control de tránsito aéreo al tránsito de aeródromo.

**TRAMO DE APROXIMACION FINAL:** Fase de un procedimiento de aproximación por instrumentos durante la cual se ejecutan la alineación y el descenso para aterrizar.

**TRAMO DE RUTA:** Ruta o parte de ésta por la que generalmente se vuela sin escalas intermedias.

**TRANSITO AEREO:** Todas las aeronaves que se hallan en vuelo, y las que circulan por el área de maniobras de un aeródromo.

**UMBRAL:** Comienzo de la parte de pista utilizable para el aterrizaje.

## ABREVIATURAS

<b>ACC</b>	Centro de control de área
<b>AIS</b>	Servicio de información aeronáutica
<b>ALS</b>	Sistemas de Luces de Aproximación
<b>AMAN</b>	Gestor de arribadas
<b>AMHS</b>	Aeronautical Message Handling System
<b>APP</b>	Control o sector de aproximación
<b>ARO</b>	Aerodrome Reporting Office
<b>ARR</b>	Arribada
<b>A-SMGCS</b>	Advanced Surface Movement Ground and Control System
<b>ATC</b>	Control de Tráfico Aéreo
<b>ATFM</b>	Gestión de flujo de tráfico aéreo. <i>Air Traffic Flow Managemet</i>
<b>ATIS</b>	Aeronautical Terminal Information Service
<b>ATM</b>	Gestión de tráfico aéreo. <i>Air Traffic Management</i>
<b>CDM</b>	Toma de decisiones en colaboración.
<b>CFL</b>	Nivel de vuelo autorizado
<b>CFMU</b>	Unidad central europea de gestión de afluencia
<b>CSYSS</b>	Sistema de control central del ACC
<b>CTOT</b>	Calculated Take-Off Time
<b>D-ATIS</b>	Digital ATIS
<b>DCL</b>	Departure Clearance /Autorización de despegue
<b>DECLOS</b>	Digital Departure Clearance System (Avibit)
<b>DEP</b>	Despegue
<b>DEP</b>	Departure Message
<b>DLA</b>	Delay Message
<b>DMAN</b>	Gestor de despegues
<b>ETD</b>	Hora estimada de despegue
<b>ETO</b>	Hora estimada de paso por fijo

**EUROCAE** European Organization for Civil Aviation Equipment  
**FAA** Federal Aviation Administration  
**FCFS** Primero en llegar, Primero en ser servido. *First come, First Served*  
**FDPT** Procesador de datos de vuelo de torre  
**FIR** Regiones de información de vuelo  
**FMU** Unidad de gestión de afluencia  
**FSM** Programación de vuelos. *Flight Schedule Monitor*  
**FVE** Faja de vuelo electrónica  
**GDP** Programa de retraso en tierra. *Ground Delay Program*  
**MOPS** Minimum Operational System Performance Specifications  
**OACI** Organización de Aviación Civil Internacional  
**OVF** Sobrevuelo  
**RPL** Repetitive flight plan  
**RWY** Pista de despegue/aterrizaje  
**SCV** Sistema de comunicaciones de voz  
**SID** Standard Instrument Departure Route  
**SI** Sistema de Integración de Información  
**SIMMOD** Airport and Airspace Simulation Model  
**SNMP** Simple Network Management Protocol  
**SSR** Radar secundario  
**STAR** Standard Instrument Arrival Route  
**TAAM** Total airspace and airport modeller  
**TCP** Transmission Control Protocol  
**TWR** Torre de control  
**VFR** Vuelo o reglas de vuelo visuales

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA LOGÍSTICA AEROPORTUARIA.\*

**AUTOR:** Andrea Carolina Castellanos Muñoz.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** logística aeroportuaria, modelos de optimización, flujo aéreo, retraso de aviones.

### DESCRIPCIÓN:

Realizar un estado del arte es fundamental para poder apropiarse del conocimiento del tema de investigación y así servir como punto de partida para establecer un nuevo recorrido que busca dar respuestas novedosas e inéditas, generando posibilidades de un futuro amplio en el escenario investigativo.

En ese sentido, se propuso como objetivo de este trabajo de grado construir un estado del arte de los modelos de optimización en logística aeroportuaria, partiendo de un estudio de fuentes secundarias y terciarias, donde se identifican los principales modelos de la temática, para finalmente obtener un análisis detallado de la evolución, tratamiento actual y tendencias del tema, con el fin de identificar oportunidades de investigación.

Para lograr lo anterior, se realizó una revisión de la literatura, que consistía en una búsqueda exhaustiva de información acerca del tema en diversas fuentes y textos relacionados a nivel mundial, complementándose con una revisión bibliográfica que permitió identificar la información relevante para el desarrollo de la investigación.

En los resultados obtenidos, se observa que los modelos de optimización empleados en: programación de vuelos, gestión de tráfico aéreo, equipaje, programación de tripulación y pasajeros, entre otros; muestran cómo se han solucionado los problemas que se presentan en el funcionamiento de un aeropuerto mediante la aplicación de diferentes experiencias computacionales que son lo suficientemente eficaces para resolver problemas de tamaño real y con la flexibilidad necesaria para adaptarse a las múltiples necesidades, generando resultados más satisfactorios tanto para los clientes como para la organización.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.  
Director: Javier Eduardo Arias Osorio.

## ABSTRACT

**TITLE:** STATE OF THE ART OF OPTIMIZATION MODELS FOR AIRPORT LOGISTICS.\*

**AUTHOR:**Andrea Carolina Castellanos Muñoz.\*\*

**KEYWORDS:**airport logistics, optimization models, air flow, aircraft delays.

### DESCRIPTION:

A state of the art is essential to acquire the knowledge of the research topic and serve as a starting point to establish a new route pursuing unprecedented and innovative answers. Thus, generate possibilities for a potential investigative stage future.

Therefore, the aim of this thesis project is the development of a state of the art of optimization models for airport logistics, based on the study of secondary and tertiary sources. The main models of the subject are identified to finally obtain a detailed analysis of achievements, current treatment and trends of the subject with the purpose of recognizing research opportunities.

In order to accomplish this goal, a review of the literature was performed. This consisted of an extensive search for information on the subject in different sources and related texts globally. The above was complemented with a bibliographic review that allowed the identification of relevant information for the development of the investigation.

Finally, this project results clearly show that optimization models used in: flight scheduling, air traffic flow management, baggage, passengers and crew scheduling, among others; explains how problems encountered in the operation of an airport are solved, by applying different computational experiences that are effective enough to overcome obstacles of real size and the required flexibility to adapt to several needs, producing more satisfactory results for both customers and the organization.

---

\* Bachelor thesis.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Javier Eduardo Arias Osorio.

## INTRODUCCIÓN

La logística ha pasado en la última década de representar la gestión integral de los flujos de materiales e información en la empresa, a significar un proceso estratégico por el cual la misma organiza y mantiene su actividad central, como lo menciona Robusté<sup>1</sup>, a partir del creciente uso de tecnologías de información y comunicaciones de manera transversal en los procesos para conectarse al interior de ellas y con otras.

En particular, en la logística aeroportuaria pueden mencionarse varios elementos que han llevado a hacer de ésta un área de gran importancia en las últimas décadas. Los aeropuertos han dejado de ser exclusivamente reguladores de tráfico aéreo, y se han convertido en centros de actividad en sí mismos, es decir, en nuevos polos de desarrollo regional con condiciones de ciudades pequeñas al interior de ellos.

Así mismo, en esta industria se han presentado significativos cambios en la movilidad de pasajeros y de mercancías, con importantes repercusiones tanto socioeconómicas como territoriales, por lo mencionado anteriormente, los aeropuertos actualmente son lugares de atracción de nuevas actividades, generalmente asociadas a la manufactura de productos de alto valor, al sector terciario y la logística de transportes.

De igual forma, el crecimiento que presenta la industria aérea, obedece entre otras cosas, a su planificación en general, al esfuerzo comercial para lograr ser competitivos, a la disminución de tarifas, al incremento de frecuencias, al aumento de trayectos directos, etc.

Lo anterior, da lugar a que se produzcan cambios en cuanto a calidad de vida (mejor gestión de tiempo y relación costo-valor), la calidad en los servicios adquiridos, etc.

---

<sup>1</sup> FRANCESC, Robusté. Logística del transporte. Cataluña: Ediciones UPC, 1967. p. 14.

Ahora bien, desde el plano táctico, la Investigación de operaciones (I.O.), es una rama de las matemáticas utilizada en diversos campos cuyo objetivo es obtener soluciones óptimas de problemas complejos a través de técnicas cuantitativas traducidas en modelos concretos. Como se podrá advertir, la investigación de operaciones (I.O.) ofrece una serie de opciones que son muy valiosas para cualquier tipo de planeación que pretenda llegar a resultados óptimos o cercanos a lo óptimo.

Aplicada a la logística, la I.O. permite obtener buenas decisiones que involucran desde las rutas que son mejores para volar, pasando por el número de empleados que se deben contratar para determinada actividad, el tipo de equipo que es adecuado adquirir, el repertorio de tarifas que se pueden ofrecer, etc. Estas decisiones se toman con base en aquello que pueda mejorar una meta deseada y que se pueda expresar cuantitativamente, es decir, son decisiones que pretenden optimizar los diferentes procesos y recursos de la propia aerolínea, y del funcionamiento del conglomerado en general.

Es por esto, que el presente trabajo de investigación se centra en caracterizar la logística aeroportuaria, estudiando su evolución en los últimos años identificando elementos relevantes y la forma de ser modelados desde la óptica de la optimización matemática. Esto se logra, en primer lugar, obteniendo una idea del sector aeroportuario en los aspectos de operación logística y, en segundo lugar, realizando un análisis de la información obtenida sobre modelos de optimización desarrollados para esta operación, clasificando los modelos encontrados, con el propósito de obtener un conocimiento claro de lo indagado y así construir un referente teórico sobre el tema.

El grupo OPALO en aras de expandir su espectro de investigación en temáticas logísticas puntuales y de actualidad inicia su inmersión investigativa en áreas donde necesariamente involucrará de manera sistémica los conocimientos adquiridos sobre problemas de optimización ya trabajados y el aprendizaje sobre temáticas interesantes que orientarán futuras investigaciones al interior del grupo.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los aeropuertos son sistemas muy complejos, con muchas influencias y varias partes de interés, como el operador del aeropuerto, los proveedores de control de tráfico aéreo, las aerolíneas, los servicios de asistencia en tierra y otros, que muchas veces no se encuentran funcionando de una forma coordinada para obtener los mejores resultados en alguna de las actividades de ésta organización; es por esta razón y con el ánimo de observar cómo se han optimizado los diferentes problemas que se presentan en el funcionamiento de un aeropuerto, que se ha recurrido a estudiar los diferentes modelos de optimización que se han realizado anteriormente haciendo uso de experiencias computacionales, ya que éstas evidencian que con el desarrollo y uso de algoritmos, estos son lo suficientemente eficaces para resolver los problemas de tamaño real y con la flexibilidad necesaria para adaptarse a las necesidades prácticas de negocios, generando así resultados más satisfactorios tanto para los clientes como para la organización.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La industria aérea ha presentado complejidades importantes, pues tomando como ejemplo solamente el transporte de mercancías o de pasajeros en el momento y hora adecuada, dentro de una dura competencia y una red logística muy ramificada, se puede observar que no es una tarea fácil y que una decisión mal tomada pueda llevar a un fin devastador; es por ello que es necesario que ésta industria tenga un sistema de decisiones robusto y confiable dentro de sus operaciones y es allí donde la I.O. ha sido y es una herramienta de mucho valor para garantizar lo acertado de una decisión.

Con lo anterior, el grupo OPALO ve necesario realizar un estudio sobre los modelos de optimización en logística aeroportuaria y, de esta forma tener un elemento de partida para que a través de sus líneas de investigación se facilite un estudio a profundidad, la generación y aplicación de herramientas para la solución de problemas en dicho sector.

Partiendo de este espacio de investigación, el interés de este estudio es adquirir el conocimiento sobre los modelos de optimización empleados en la logística aeroportuaria con el fin de caracterizarlo en cuanto a temas tanto de logística como del área de investigación de operaciones.

El desarrollo de este estudio está enfocado a fomentar investigaciones en el área de mejoramiento y optimización de procesos que fortalezcan la actividad científica de la Universidad Industrial de Santander y genere un impacto en la creación de nuevo conocimiento que apoye el proceso de investigación regional y nacional. Además, permitirá al Grupo en Optimización y Organización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos (OPALO) brindar solución a modelos de optimización acordes a lo que la industria requiere, y permitirá fortalecer la identificación de futuras líneas de investigación que fomenten la visibilidad académica del grupo.

### 3. OBJETIVOS

#### **Objetivo General**

Construir un estado del arte de los modelos de optimización en logística aeroportuaria, obteniendo un análisis detallado de la evolución, tratamiento actual y tendencias del tema con el fin de identificar oportunidades de investigación.

#### **Objetivos específicos**

- Realizar una revisión de la literatura sobre modelos de optimización en logística aeroportuaria.
- Realizar una inmersión teórica en la conceptualización de los aspectos relacionados con la temática planteada.
- Analizar los resultados de la revisión de la literatura, clasificando e integrando los diferentes avances, planteamientos, propuestas y desarrollos relacionados con los modelos de optimización en logística aeroportuaria.
- Enmarcar el análisis de la revisión de la literatura al contexto latinoamericano.
- Elaborar un artículo publicable que enmarque los principales resultados del trabajo de investigación.

## 4. MARCO TEÓRICO

El siguiente marco teórico tiene como fin definir las bases teóricas sobre las cuales se van a apoyar los argumentos presentados en este documento.

La importancia de este radica en la necesidad de establecer el enfoque teórico que prevea un marco de referencia orientando así el desarrollo del estudio realizado en este trabajo de grado.

### 4.1 ESTADO DEL ARTE

Según Galeano<sup>2</sup>, un estado del arte es una herramienta oportuna en medio del escenario que plantea el fenómeno de la globalización, pues el estrépito producido por el desarrollo acelerado de las telecomunicaciones ha ocasionado una producción masiva de diferentes géneros textuales relacionados con los temas más diversos. El estado del arte, es entonces un mecanismo de estudio, regulación y control que se enmarca en la investigación documental. Este “estilo” de investigación posibilita en un primer momento realizar un proceso sistemático sobre la información recolectada en torno a un tema de investigación, para ubicarlo en un contexto<sup>3</sup>.

Así mismo, el estado del arte se trata de un tipo de investigación que sugiere y practica un ejercicio de interpretación<sup>4</sup>. Así las cosas, es preciso que el investigador construya algunas categorías que le permitan diseñar ejes adecuados para estructurar un análisis comparativo. De esta manera, se pretende encontrar algunas relaciones entre las tecnologías o procedimientos que se han diseñado -y publicado en distintos soportes documentales- y la teoría que se ha gestado alrededor de un objeto o tema de estudio determinado. Para este fin, el investigador debe examinar las publicaciones encontradas y establecer una relación diferencial entre el conocimiento que han producido los expertos y el

---

<sup>2</sup>GALEANO, Deicy. Una metodología crítico hermenéutica para la elaboración de estados del arte. Medellín: Instituto de estudios políticos, 2004. p. 15.

<sup>3</sup>Ibid. p. 17.

<sup>4</sup>Ibid. p. 18.

objeto de estudio de los documentos publicados. En otras palabras, un estado del arte permite construir distintos puntos de encuentro y disidencia entre múltiples esferas y/o actores académicos.

Para que sea adecuado un estado del arte, debe mostrar una interpretación asertiva acerca de las perspectivas investigativas y los objetivos que hayan tenido los autores de las publicaciones; en este sentido, en su misma construcción, el estado del arte transmite la dinámica relacional de los sujetos que están presentes, con el fin de plantear situaciones posibles a profundizar, espacios de nuevas acciones, teóricas y metodológicas, para construir de manera sistémica nuevas interpretaciones y así avanzar en el área del conocimiento<sup>5</sup>.

En sí mismo, el estado del arte faculta la sistematización de diferentes géneros textuales o documentos que hayan sido producidos en un campo de estudio y en un lapso delimitado, ordenando los datos en diferentes categorías. Dicha sistematización permite identificar los resultados que se hayan destacado en una esfera del conocimiento. Los resultados sistematizados permiten señalar el abordaje que se ha otorgado a varios temas, así como los paradigmas que han dominado la producción académica más reciente.

Sistematizar la información contenida en diferentes documentos de un mismo género textual permite identificar espacios, datos, realidades o fenómenos que aún no han sido objeto de análisis en el campo de estudio abordado. El reconocimiento de estas zonas inexploradas, permite que los investigadores o académicos más recientes puedan considerar dichos vacíos como objetos de estudio pertinentes para estimar nuevos proyectos de investigación.

Es oportuno mencionar que el estado del arte es una investigación, que en el reconocimiento de su carácter científico, delimita su objeto de estudio. En este sentido, un estado del arte pondrá en evidencia su objeto, términos de espacio y tiempo. Además de otorgarle un carácter científico a la investigación, el estado del

---

<sup>5</sup> Ibid. p. 20.

arte limita su objeto de estudio debido al amplísimo conjunto de datos y documentos que podrían existir sobre un mismo tema, pues dependiendo del estudio documental dicha especificidad será mayor o menor.

Según Martínez<sup>6</sup>, “el sentido del estado del arte como un estudio orientado a la investigación documental no reside únicamente en su aspecto técnico”, es decir, en la metodología que emplea para buscar, sondear, organizar, integrar, analizar e interpretar la información. Antes bien, la pertinencia de este tipo de estudio se entiende a partir su orientación o el impacto social, cultural o institucional que genera.

En este orden de ideas, el estado del arte comienza con una intencionalidad clara. Así, la estructura de la investigación variará según la consulta documental que el investigador elija como material de análisis<sup>7</sup>. Esta elección no será arbitraria puesto que el estado del arte debe enmarcar un objeto de estudio, toda vez que se haya encontrado la necesidad de resaltar una cuestión documental y en tanto haya existido el espacio para formular nuevas preguntas alrededor de lo publicado.

Con relación a la importancia del estado del arte en la investigación, Jiménez<sup>8</sup>, menciona que este tipo de análisis puede considerarse como una herramienta académica necesaria desde tres ejes propositivos. Uno de ellos es concebirlo como un método para comprender el conocimiento producido en un espacio académico concreto. Esta comprensión no se queda en la lectura de investigaciones aisladas que se hayan realizado sobre determinado estudio, por el contrario, se intenta comprender su evolución como un todo que debe ser revisado continuamente, para integrar y permitir evolucionar en la construcción de diferentes conocimientos. Es decir, como un método de descubrimiento que

---

<sup>6</sup>MARTÍNEZ, Luis A. ¿Qué significa construir un estado del arte desde una perspectiva hermenéutica? En: Criterios, No. 8, Pasto, 1999. p. 13.

<sup>7</sup>Ibid, p. 14.

<sup>8</sup>JIMÉNEZ BECERRA, Absalón. El estado del arte en la investigación en las ciencias. En: La práctica investigativa en ciencias sociales. Bogotá, D.C.: Universidad Pedagógica Nacional, 2004. p. 29.

evidencia diferentes hallazgos acerca de espacios en los que se puede delimitar nuevas preguntas investigativas.

Por otro lado, Hoyos<sup>9</sup> define al estado del arte como un elemento importante de la investigación que evidencia un número de resultados impredecibles sobre un campo del saber específico, siendo proclive sobre del carácter científico del estado del arte, al enunciar que no es un producto finalizado, puesto que su intención es ser punto de partida para nuevos espacios y nuevos paradigmas en la investigación aplicada a un objeto de estudio determinado<sup>10</sup>.

Desde la metodología abordada para la realización del estado del arte se deberían considerar los siguientes cinco principios:

1. Principio de finalidad. Siendo necesario plantear metas u objetivos bien definidos antes de comenzar el estudio
2. Principio de coherencia. Puesto que la investigación debe tener una estructura interna consolidada. Es decir, debe existir una conexión apreciable entre el objeto de estudio, los objetivos, la metodología, los resultados, y otras fases de la investigación
3. Principio de fidelidad. En cuanto a la legitimidad en la recogida de datos y en su transcripción, en cualquier fase de la investigación
4. Principio de integración. Donde el análisis individual debe estar cohesionado con el tema de la investigación.
5. Principio de comprensión. Asociado a la capacidad interpretativa del modelo investigativo. A través del estado del arte, deben apreciarse conclusiones acerca de la investigación o las publicaciones que se han realizado sobre un tema.

---

<sup>9</sup>HOYOS BOTERO, Consuelo. Un Modelo para la Investigación Documental. Medellín: Señal Editora, 2000. p. 118.

<sup>10</sup>Ibid. p. 119.

En su documento guía, Lopera y Gutiérrez<sup>11</sup> establecen una serie de directrices para constituir asertivamente un estado del arte, destacando el rol constructivo al interior de la investigación documental. Donde esta le imprima al estado del arte:

- El aportar a la construcción de un lenguaje común que permita la comunicación transparente, efectiva, ágil y precisa entre estudiosos o interesados en el tema objeto de estudio.
- Ubicar, clasificar, caracterizar y consolidar información sobre el estado actual en la producción teórica, metodológica o práctica sobre el tema objeto de estudio.
- Identificar vacíos o necesidades referidas a la producción documental en el campo del saber objeto de investigación<sup>12</sup>.

Con lo anterior, este proceso de recolección de información sobre modelos de optimización el logística aeroportuaria, se podría resumir en primera instancia en:

- Planificación estratégica.
- Selección de fuentes informativas: Dada la gran variedad de fuentes de las que puede proceder la información es necesario filtrar y seleccionar aquellas fuentes (ver anexo A) que nos resultan más creíbles, proporcionan datos más actualizados, y que nos resulten más productivas.
- Seguimiento y análisis de las fuentes.

## 4.2 LOGÍSTICA

Durante años, según Servera<sup>13</sup>, la función logística se concibió de nivel operativo con una misión de traslado desde los centros de producción a los puntos de

---

<sup>11</sup> LOPERA, María y GUTIERREZ, Elkin. Orientación para la formación de proyectos de grado, Metodología Estado del Arte. En: Cartilla de investigación formativa, escuela colombiana de mercadotecnia [en línea], Febrero-Marzo, 2010. [consultado el 13 de octubre de 2013]. Disponible desde internet en <<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r81860.pdf>>

<sup>12</sup>Ibíd. p. 13.

<sup>13</sup> SERVERA-FRANCÉS, David. Concepto y evolución de la función logística [en línea]. EN: Innovar, Revista de Ciencias Administrativas y Sociales, vol. 20, núm. 38, Septiembre-Diciembre, 2010, pp. 217-234. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. [Consultado en septiembre de 2013].

consumo. Desde esta perspectiva, la función logística en la empresa fue contemplada únicamente como un centro generador de costos sin capacidad de diferenciación. En el ámbito académico, su estudio se enfocaba desde la perspectiva industrial o técnica, en busca de modelos que permitiesen optimizar espacios, planificar distribuciones y reducir costos. Con el tiempo, la globalización de la economía y la consiguiente apertura de nuevos mercados distanciados geográficamente fueron cambiando la percepción de la función logística hacia nuevas dimensiones, en las que la función logística permite ciertas ventajas competitivas basadas en la reducción de los tiempos de entrega principalmente. Y es a partir de 1960, cuando la gestión logística siguiendo los postulados de marketing, adquiere una orientación hacia el cliente que se materializa en ofrecer un servicio logístico ajustado a las necesidades y requisitos del mismo, que permita su satisfacción. Desde este momento, la función logística en la empresa empieza a ser tratada como una función estratégica que ofrece diferenciación en el mercado.

Según Ballou<sup>14</sup>, “el valor en la logística se expresa fundamentalmente en términos de tiempo y lugar”. Los productos y servicios no tienen valor a menos que estén en posesión de los clientes cuándo (tiempo) y dónde (lugar) ellos deseen consumirlos. Una buena dirección logística visualiza cada actividad en la cadena de suministros como una contribución al proceso de añadir valor.

Por ello, según Iyer<sup>15</sup>, se debe contemplar el proceso logístico como un todo, que permite desde las materias primas de los proveedores hasta los bienes terminados, inyectar aspectos de eficacia y eficiencia relacionados con tiempo, calidad, costos y nivel de servicio, principalmente.

Es así como se entiende que la función logística en una organización involucra todos los niveles de gestión e incluye decisiones estratégicas, tácticas, operativas

---

<sup>14</sup> BALLOU, Ronald. Logística y cadena de suministro. Editorial Prentice-Hall. 2004.

<sup>15</sup> IYER, S. Distribution of the lifetime of consecutive k-within -n: EN: F systems. IEEE Trans Reliability, 1992. p. 448–450.

y de colaboración. Donde la toma de decisiones, requiere en ciertos niveles la necesidad de repensar y reconfigurar estrategias trazadas y en consecuencia, la racionalización de los procesos operativos asociados.

### **4.3 LOGÍSTICA AEROPORTUARIA**

Según Norin et al.<sup>16</sup>, “la logística del aeropuerto es la planificación y control de los recursos que generan valor en los clientes que la utilizan, entendiendo por *clientes* no sólo a los pasajeros, sino también a las cargas que son transportadas, las aerolíneas y demás actores que operan en el aeropuerto”; es por esto que la visión de la logística aeroportuaria es el desarrollo de una visión completa de todos los procesos y actividades en el aeropuerto, y en particular, una visión en tiempo real y con la capacidad de control sobre todos los recursos en uso o que puedan utilizarse para apoyar el sistema de transporte aéreo.

El sistema de transporte aéreo (ATS, por sus siglas en inglés) involucra a muchos actores con diferentes objetivos, que pueden ir muchas veces en direcciones contrarias. Sin embargo y en definitiva, el objetivo general del ATS, es mejorar la integración entre aeropuerto y aerolínea, para permitir la colaboración en la toma de decisiones a través de un mejor uso de intercambio de información en tiempo real y así suplir las necesidades de los clientes en el momento preciso.

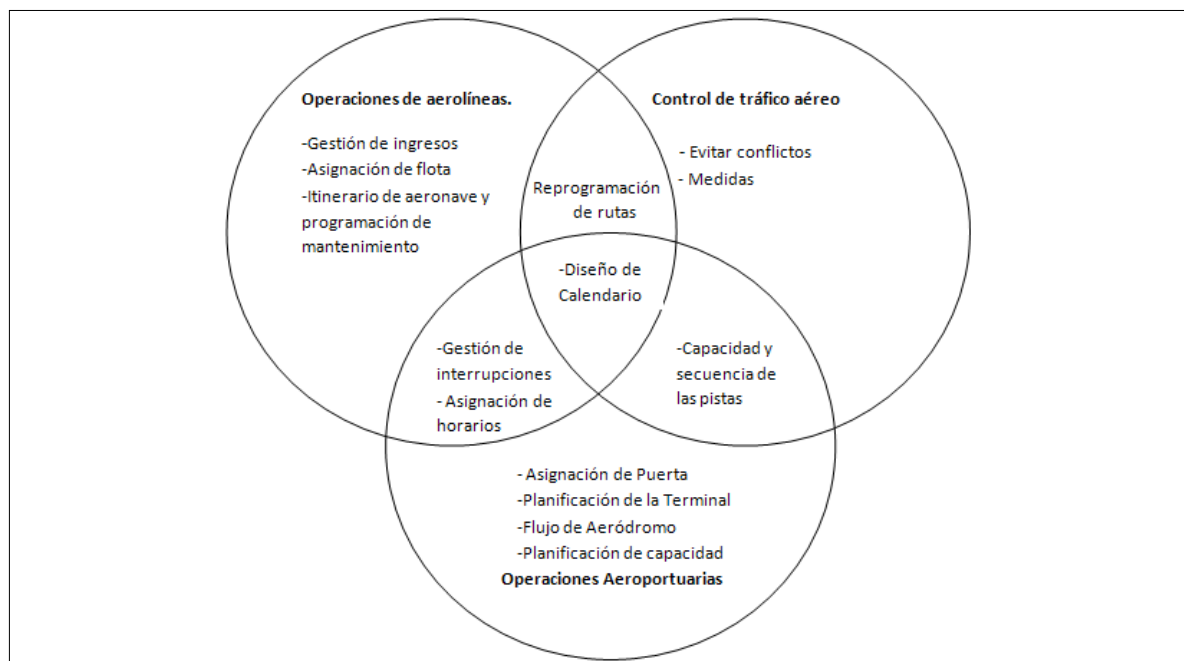
Por su parte, la gestión de los recursos en el ATS, incluye muchas áreas tales como se muestran en la figura 1, donde se evidencian los tres principales actores del ATS: aerolíneas, aeropuertos y control de tráfico aéreo (ATC, por sus siglas en inglés). En este contexto, el ATC representa a todos los actores responsables de la gestión del tráfico aéreo (ATM, por sus siglas en inglés), considerando ampliamente que algunas tareas de planificación tienen que llevarse a cabo conjuntamente por más de un actor.

---

<sup>16</sup> NORIN A., GRANBERG T., YUAN Di & VÁRBRAND Peter., Airport logistics- a case study of the turnaround process, 2012, Journal of air transport management, (20), 31-34.

De acuerdo a lo anterior, y según Lohatepanont et al.<sup>17</sup> la gestión de los recursos en las operaciones de las aerolíneas, está dada por ingresos/costos-impulsados, e incluye los temas de planificación en todos los niveles: el diseño de la programación, la asignación de la flota, la planificación del mantenimiento, la vinculación de la tripulación, la asignación de la tripulación y la gestión de los ingresos. Y más aún, como lo menciona Barnhart et al.<sup>18</sup>, en los últimos años ha habido un creciente interés en la gestión integrada (por ejemplo la asignación de las flotas combinadas, el mantenimiento de los aviones y la programación de la tripulación), así como en la gestión de la interrupción, es decir, en la gestión que se debe realizar para recuperar algún vuelo que había sido programado, pero que ha sido interrumpido debido a algún retraso lo que ha afectado en su calendario.

**Figura 1.** Retos de la gestión de los recursos e iniciativas del ATS



**Fuente:**NORIN A., GRANBERG T., YUAN Di & VÁRBRAND Peter., Airport logistics- a case study of the turnaround process, 2012, Journal of air transport management.

<sup>17</sup> LOHATEPANONT M; C BARNHART C. Airline Schedule planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment, Transportation Science. 2004. 38(1), 19-32.

<sup>18</sup> BARNHART C; BOLAND C; CLARKE L; JOHNSON; G NENMHAUSER G.; SHENOI R. Flight String Models of Aircraft Fleet and Routing, transportation Science 32. 1998. pp 208-220.

La gestión de recursos en los aeropuertos está relacionada con el concepto de logística aeroportuaria, ya que esta tiene por objetivo captar la interacción entre los procesos, y más importante aún, entre los procesos de aeropuertos y los de ATM; como por ejemplo: elementos relevantes en la gestión de recursos en la zona de operaciones de un aeropuerto incluyen la capacidad de pista, la secuenciación de la pista y el rodaje, la asignación de turnos y la asignación de la puerta y la programación de salida . En el sector de tierra y la terminal de un aeropuerto, esta gestión se centra principalmente en el análisis de las operaciones del mismo.

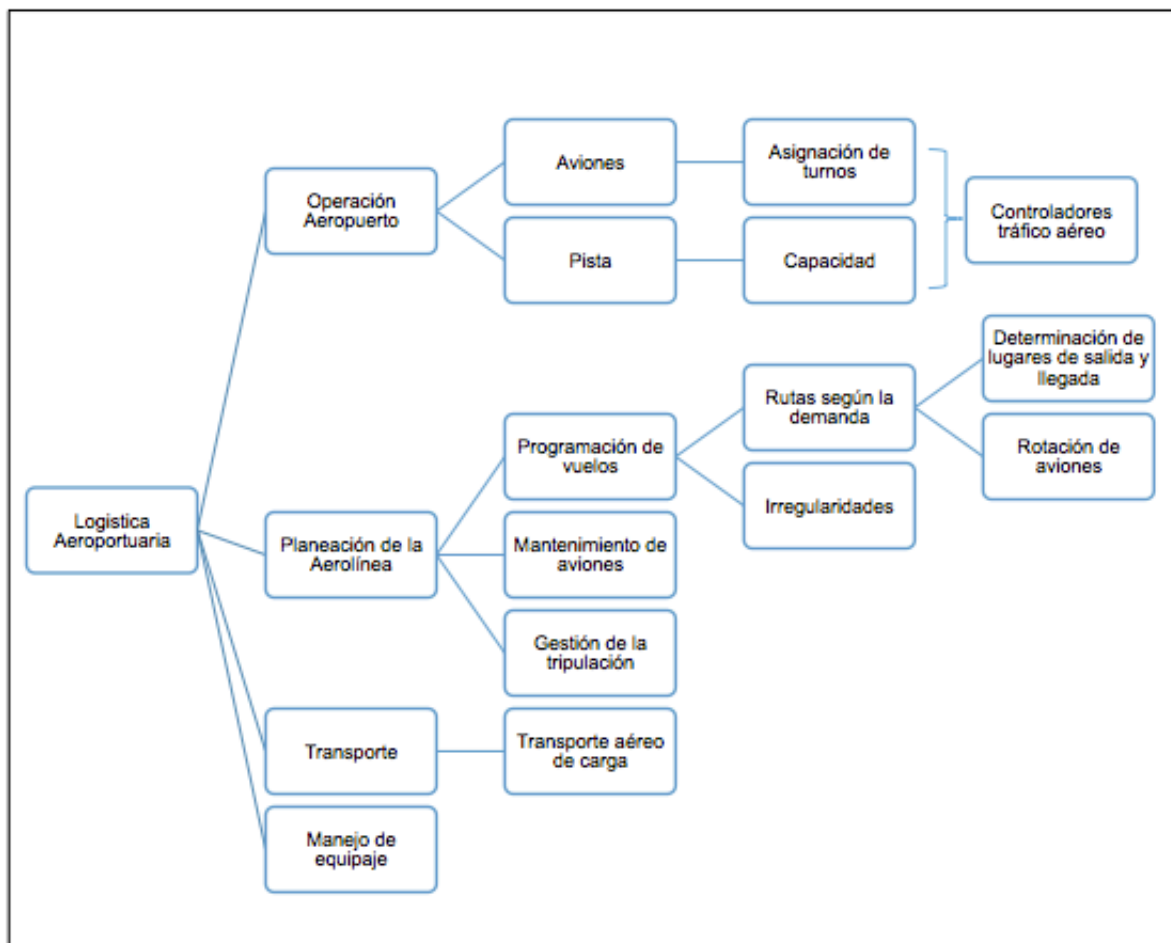
Con lo anterior, se puede observar que el correcto funcionamiento de un aeropuerto está delimitado por la forma en que éste opera y se llevan a cabo las diferentes actividades logísticas que se realizan dentro del mismo, concibiendo la total interrelación entre las actividades de los diferentes procesos que implica que cualquier falla en algún área, tiene grandes repercusiones en el resultado final que se esperaba obtener en la operación en general, y es precisamente por estas razones que se han sumado esfuerzos para mejorar los diferentes inconvenientes logísticos que se van generando en las diferentes áreas que soportan un aeropuerto.

De manera complementaria, se puede considerar que dentro de los llamados “clientes” se incluyan las líneas aéreas, las compañías de manejo, los pasajeros, los propietarios de la carga y el ATC. La eficiencia global del sistema es una función sistémica en sí misma, compleja por demás en la cual para lograr su máximo valor la información sobre las operaciones de un actor debe ponerse a disposición de todos los demás actores. Este es también el concepto básico de “la toma de decisiones en colaboración” (CDM, por sus siglas en inglés); puesto que tanto aerolíneas, aeropuertos, empresas de manipulación y ATC, deben obtener acceso a la misma información dentro del sistema.

Como se ha mostrado de manera sucinta, con el paso del tiempo el término aeropuerto cada vez envuelve más actividades y engloba más servicios a parte del

despegue y aterrizaje de aeronaves, como se muestra en la **figura 2**. El aeropuerto ha pasado a convertirse en una mini-ciudad, con actividades comerciales, industriales y de servicio, actividades logísticas vinculadas al transporte aéreo o al aeropuerto, tratamiento de mercancías, entre otros, debido a que los aviones no son los únicos medios que están presentes en un aeropuerto, se encuentran diferentes vehículos que cumplen con una variedad de servicios como el transporte de pasajeros, de equipaje, carga, limpieza de aeronaves, etc. Así pues, se puede entender que la tarea de la logística abarca grandes sectores y por tanto de su correcta aplicación y funcionamiento, dependerá el éxito del sistema en sí.

**Figura 2.** Áreas de la logística aeroportuaria



Para considerar una adecuada caracterizar del tema abordado es importante conocer en un nivel de abstracción mayor lo que se concibe para cada una de las áreas diagramadas de la logística aeroportuaria.

**4.3.1 Operación aeropuerto.** Para la planeación de los aeropuertos, se ha de partir de lo más importante: los aviones, los cuales se clasifican en flotas que son grupos de aviones del mismo tipo que tiene una compañía (la clasificación de aviones generalmente se basa en su peso) y pueden variar de acuerdo a las características operativas, tamaño del avión, capacidad, etc.

La capacidad de los aeropuertos y por tanto de las pistas de aterrizaje, se convierte entonces en un factor limitante de la capacidad para cubrir la demanda de vuelos. Esto desemboca en retrasos tanto en el tráfico aéreo como en las operaciones que se realizan en tierra. La capacidad de pista para aterrizaje depende de la categoría del avión y la secuencia de aterrizaje, puesto que el tiempo requerido entre aterrizajes consecutivos depende de la categoría de los aviones.

Los aviones son guiados por unos controladores, y llegan al aeropuerto aproximadamente 30 minutos antes del aterrizaje. A partir de ese momento, el controlador debe crear un flujo de aviones hacia la pista. Debido al tiempo limitado disponible y la alta carga de trabajo de los controladores, es complicado realizar cualquier cambio en la secuencia de aviones en ese momento.

El aterrizaje, que según Beasley et al.<sup>19</sup>, se define como el proceso que realiza una aeronave que culmina con el contacto de la misma con el suelo, considera en sí mismo unos factores, a saber:

- Tierra: Al establecer comunicación con los controladores de tráfico aéreo, para solicitar aterrizaje, tener información de la pista y de la iluminación del área.

---

<sup>19</sup> BEASLEY; JE. Krishnamoorthy, SHARAIHA M; YM. Abramson. Displacement Problem and dynamically scheduling aircraft landings // Journal of the Operational Research Society. 55. 2004. p. 54 – 64.

- Avión: Al efectuar el procedimiento necesario (maniobras de reducción de velocidad y demás) para que el avión pueda tener un descenso controlado.
- Aire: Al considerar las condiciones en las que el avión aterrizará.

De igual forma, el aterrizaje considera unas etapas como son:

- Tramo base: Se decide en qué distancia comienza el descenso y en qué momento debe virar para estar alineado con el eje de la pista.
- Aproximación final: Descenso del avión alineado con la pista. El objetivo es facilitar el contacto con la pista, a una velocidad que no suponga riesgo de pérdida.
- Tramo de recogida: Transición de las dos fases anteriores y se realiza a 20 pies por encima del suelo.
- Fin del aterrizaje: Cuando las ruedas hacen contacto con el suelo.
- Rodaje: El aterrizaje no concluye hasta que el avión no tiene una velocidad normal de rodadura o hasta que está detenido totalmente.

En las etapas anteriores interfieren diferentes actores como son:

- Controlador de tráfico aéreo: Se encarga de dirigir el tránsito de la aeronave en el aeropuerto y el aire, de manera rápida y segura. En particular, Se encarga de asignar el tiempo de aterrizaje, la pista; labor que es complicada, debido a los posibles cambios meteorológicos u otros imprevistos.
- Para mantener la seguridad, los controladores aplican las normas dispuestas y las recomendaciones dadas por la organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) y demás autoridades aeronáuticas de cada país.
- Asistencia en tierra: Incluye todos los servicios de que es provista una aeronave desde que aterriza hasta que parte de nuevo. Servicios como: catering (abastecimiento de alimentos para pasajeros y tripulación), servicio en rampa (servicios en plataforma de operaciones y los procesos necesarios para la carga y descarga de correo, equipaje, mercancías., servicio de cabina, combustible, entre otros.

Con el aumento de demanda de las últimas décadas, y por ende el enorme aumento de los pasajeros transportados diariamente a nivel mundial, se hace evidente que debe desarrollarse una coordinación para que los aviones puedan despegar y aterrizar en el número limitado de pistas de las que disponen los aeropuertos.

Pueden existir situaciones que generen contratiempos como fallos mecánicos, combustible contaminado, entre otros, que pueden retrasar el vuelo u obligar a un vuelo a tomar una ruta distinta o que deba realizar un aterrizaje de emergencia y por lo tanto afectar las planificaciones previamente elaboradas con las operaciones diarias donde se habían planeado con antelación las llegadas y salidas de los aviones.

Según Wei et al.<sup>20</sup>, las tres causas más comunes de contratiempos son los problemas meteorológicos, problemas mecánicos de aviones y los problemas de control de tráfico. Tales eventos se producen de forma continua y repetitiva, y son denominadas operaciones irregulares.

Según MCCartney<sup>21</sup>, “el impacto de las operaciones irregulares en una línea aérea es significativo”, ya que de ellas se derivan una serie de problemas que repercuten considerablemente en las compañías aéreas (retrasos de vuelos en tasas cercanas al 20%, tasas de cancelación entre el 3% y el 5%, y los costos está en el orden de las decenas de millones de dólares al año, dependiendo del tamaño de la compañía aérea. Y dentro de estos costos, se incluyen los gastos que hay que pagar por transporte, tripulación, hospedaje tanto para clientes como para la tripulación, entre otros).

Se han encontrado dos aspectos importantes de las operaciones irregulares: uno es el balance de las aeronaves problema, es decir, volver a implementar la

---

<sup>20</sup>WEI,Guo., YU , Gang y SONG, Mark. Optimization Model and Algorithm for Crew Management During Airline Irregular Operations. Journal of Combinatorial Optimization 1. 1997. p. 305–321

<sup>21</sup>MCCARTNEY S. The inexact science of keeping an airline on schedule. EN:Wall Street Journal. New York. Vol. 1. 11, Septiembre,1996.

aeronave de modo que en un punto posterior en el tiempo, la aeronave pueda estar en el lugar correcto, en el momento adecuado y con el tipo de equipo correcto para que coincida con el horario del vuelo; el otro aspecto es el equilibrio de la tripulación, es decir, que coincidan los horarios de vuelo con la tripulación.

**4.3.2 Planeación de la aerolínea.** Se considera que el primer paso formal en la planeación de la aerolínea, está dado por la programación de los vuelos; para este caso, el proceso comienza con el desarrollo de las rutas, donde cada aerolínea decide a dónde va a viajar de acuerdo a la demanda que se presenta, originándose así una red logística que puede ser o no compleja dependiendo del tamaño de la empresa.

Seguido a esto, se comienza a determinar cuáles son los lugares de salida y llegada, las posibles escalas y frecuencias a lo largo de la semana, para finalmente empezar a satisfacer la demanda asignando los pasajeros a los aviones indicados para que no se desaproveche ninguna de las utilidades que estos puedan generar.

Por otro lado, la rotación de aviones se ha considerado como un problema aislado a la asignación de flotas, cuyo objetivo según Gopalan et al.<sup>22</sup>, es asegurarse que se cumplan las restricciones de mantenimiento, y hacer ciertas variaciones al plan trazado que permitan lograrlo sin afectar a su estructura. Se refiere esto a un problema logístico que requiere que los aviones estén conectados en conjuntos con sus respectivas rutas, y éstos a su vez tengan su conjunto de aeropuertos donde puedan descansar.

a. Mantenimiento

El mantenimiento varía dependiendo de la compañía aérea, el avión, el programa de mantenimiento implementado, entre otros.

---

<sup>22</sup> GOPALAN, R. y TALLURI, K. The Aircraft Maintenance Routing Problem. EN: Operations Research. Vol. 46. No. 2. Marzo-Abril. 1998.

Talluri<sup>23</sup> describe cuatro tipos de mantenimiento para aeronaves:

- Separaciones importantes infrecuentes.
- Inspecciones visuales menores cada pocos días.
- Actividades menores de mantenimiento más frecuentes (la limpieza, abastecimiento de combustible)
- Inspección general que se lleva a cabo durante el tiempo de respuesta, junto con la carga y descarga de pasajeros.

Al querer optimizar la eficiencia en el área de mantenimiento, se busca:

- Reducir demoras y cancelaciones.
- Maximizar el uso de la flota.
- Minimizar riesgos (garantizando seguridad y calidad).
- Reducir y minimizar costos.
- Definir y alinear procesos.
- Desarrollar proyectos que permitan aumentar el nivel de servicio con los pasajeros.

Lo anterior se logra a través de la implementación de sistemas informáticos que permitan establecer el control y planificación constante de las tareas de mantenimiento, debido a que la gestión eficiente de mantenimiento tanto preventivo como correctivo, es importante para garantizar el nivel de servicio al cliente y para que los costos de operación, sean los más bajos posibles.

#### b. Gestión de la tripulación

Por otra parte, según Gopalakrishnan et al.<sup>24</sup>, la gestión de la tripulación se ha convertido en el punto más importante en el momento de la toma de decisiones para recuperar un vuelo, debido a que aquí es donde se tienen que coordinar

---

<sup>23</sup> TALLURI K., 2004. The four-day Aircraft Maintenance Routing Problem. *Transport. Sci* 32, 43-53.

<sup>24</sup> GOPALAKRISHNAN, Balaji; JOHNSON Ellis. *Airline Crew Scheduling: State-of-the-Art. EN:Annals of Operations Research* 140. 2005. p. 305–337.

todos los esfuerzos para que la operación salga adelante, no sin antes tener en cuenta toda la planificación que trae ésta área:

- **Horario de vuelos:** Su construcción se basa generalmente en la demanda del mercado para los segmentos del vuelo.
- **Flota asignada:** Los aviones disponibles se asignan a las *“flight legs”*. Los ingresos de un tramo de vuelo dependen del mercado para el vuelo de ida y el tamaño de la aeronave que se utiliza. El objetivo es maximizar los ingresos con la restricción que requiere que todos los tramos de vuelo deban recorrerse utilizando la flota que está disponible.
- **Itinerario de la aeronave:** Considerando sus vuelos a diferentes destinos.
- **Emparejamientos Crew:** Un emparejamiento es una secuencia de tramos de vuelo o segmentos que comienzan y terminan en una base tripulación de tal manera que en la ciudad de llegada, la secuencia de un tramo de vuelo coincide con la ciudad de salida de la siguiente etapa del vuelo. Cada emparejamiento tiene un costo asociado. El objetivo es encontrar un subconjunto de estas parejas con un costo mínimo que cubra todos los tramos de vuelo en el programa una sola vez. Al igual que en la etapa previa, hay un gran número de normas y otras restricciones aplican durante esta etapa.
- **Bidlines/Alineaciones:** Se configura el calendario que puede volar determinada tripulación, éste se diseña con el conjunto óptimo de emparejamientos generados a partir de la etapa anterior. El calendario se llama bidline (o lista) para la tripulación. Se llama bidline porque los pilotos pueden hacer una oferta en las líneas generadas con base en la antigüedad y otras consideraciones. Esta etapa determina el número exacto de miembros de la tripulación de cabina que la compañía aérea requerirá para el periodo de tiempo establecido. Una vez más, cada bidline debe satisfacer varias limitaciones similares a las de las dos etapas anteriores.

Entonces, según Arguello et al.<sup>25</sup>, el objetivo del sistema en esta parte es hacer frente al problema de la recuperación de los horarios del personal cuando se producen interrupciones.

Los desafíos de la gestión de la tripulación durante las operaciones irregulares incluyen diferentes aspectos: el entorno dinámico de decisiones cuando las situaciones sobre el terreno cambian rápidamente, los recursos fuertemente conectados tales como aeronave y la tripulación como resultado de la programación eficaz, las complejas y restrictivas legalidades de tripulación, y el tiempo de respuesta rápido, plantean dificultades para el proceso de resolución de problemas. Por otra parte, desde un punto de vista práctico, con frecuencia puede no ser necesario disponer de una solución óptima. De hecho, ni siquiera es necesario tener una solución completa. Todo lo que se necesita se puede encontrar en algunas soluciones de buena calidad que resuelven los problemas más urgentes, ya que una solución completa puede no existir en absoluto o puede tomar mucho tiempo para encontrarla.

**4.3.3 Transporte aéreo de carga.** El transporte aéreo, como bien se sabe, no sólo incluye el transporte de pasajeros de un lugar a otro, sino que también incluye el transporte de carga. De acuerdo con la principal Asociación de Carga Aérea (TIACA)<sup>26</sup>, las siguientes son las principales razones del crecimiento del sector:

- Desregulación y liberación de la industria de carga aérea.
- La interdependencia global promovida por los acuerdos de intercambio mundial.
- Las ventas y producción internacionales de bienes y servicios.
- Nuevos conceptos de control de inventarios.
- Artículos de consumo ahora elegibles para ser enviados por aire.
- El vasto desarrollo de artículos de alto valor y de tiempo limitado de consumo.

---

<sup>25</sup>ARGUELLO, Michael, *et. al.* A New Era for Crew Recovery at Continental Airlines. February 2004. pp. 5-22.

<sup>26</sup>The Global Voice of Air logistics. The International Air Cargo Association TIACA, p. 14.

La industria de carga aérea ha evolucionado a una industria de logística aérea; la diferencia radica en que mientras la carga aérea hace referencia a la porción aérea del viaje, la logística aérea se encarga de administrar la entrega puerta a puerta. En el sector de la carga las tendencias actuales son el ofrecer un servicio multifuncional al servir como un canal de distribución.

Según Izquierdo<sup>27</sup>, es una actividad económica compleja el transporte de carga que permite y facilita el tránsito de mercancías de un origen a un destino. El cual está compuesto por tres elementos interrelacionados: la infraestructura, el vehículo y el servicio.

En el transporte de carga aérea, se pueden encontrar dos tipos de carga:

- Carga granel: Puede ser líquida o sólida, y en general puede ser almacenada en tanques o silos y transportada por medio de bandas o ductos, respectivamente. No se requiere embalaje o unitarización.
- Carga general: Son artículos individuales que pueden transportarse como carga suelta o no unitarizada, ya sea como paquetes, sacos, cajas, etc., o como carga unitarizada en pallets o contenedores, en los cuales se agrupa la carga suelta, permitiendo una manipulación de la carga más fácil y rápida.

De igual forma, la carga se puede clasificar en:

- Carga peligrosa: Según Rubial<sup>28</sup>, se le llama así a aquella carga compuesta de productos peligrosos, por sus características explosivas, combustibles, oxidantes, venenosas, radioactivas o corrosivas, y que pueden causar daños a otros productos, al vehículo en que se movilizan, o incluso a las personas o al medio ambiente.

Este tipo de mercancía requiere de embalaje especial, debidamente marcado y etiquetado para que se le dé el manejo adecuado, teniendo en cuenta todas las

---

<sup>27</sup> IZQUIERO Rafael “Transportes un enfoque integral” 2004. capítulo 2.1

<sup>28</sup> RUBIAL, H., Alberto. “Gestión logística de la distribución de la física internacional” Grupo editorial normal.2010.pp: 19.

restricciones que puedan tener estos productos, de acuerdo a lo estipulado en el reglamento de mercancías peligrosas de la IATA.

- Carga perecedera: Es aquella que sufre degradación como resultado del paso del tiempo y del medio ambiente. Aquí se encuentran las frutas, verduras, carnes, flores, entre otros. Donde para el manejo de ese tipo de carga es fundamental el uso de sistemas coincidentes con la cadena de frío, acordes con las características del producto<sup>29</sup>.
- Carga de restos humanos.
- Carga húmeda: La conforman todo los productos obtenidos del mar, aquí también forman parte las medicinas, vacunas que necesitan ser transportadas de un lugar a otro.
- Cargas pesadas: Superiores a 150 kg.
- Carga de valor: Metales preciosos, dinero.

Existen diferentes tipos de aviones para carga, a saber:

- Fuselaje estrecho: Las posiciones de carga están unas tras otras.
- Fuselaje ancho: las posiciones de carga están una tras otra y una al lado de la otra.
- De pasaje y carga: La cabina se destina a los pasajeros, los compartimientos inferiores son para carga y equipaje.
- De carga: Tanto la cabina como los bellies se dedican a transportar carga en contenedores o pallets.
- Combi o mixtos: Parte de la cabina se destina a la carga y pasaje, y los bellies se destinada para carga y equipaje.

---

<sup>29</sup> Ibid. p. 9.

**4.3.4 Manejo de equipaje.** Según Creighton et al.<sup>30</sup>, los sistemas de manejo de equipaje son las redes basadas en transportadores que trasladan el equipaje desde el servicio de check-in y estaciones de transferencia a los muelles de salida. El equipaje asociado a un vuelo en particular se asigna a un muelle específico o conjunto de muelles de una ventana de tiempo asignada. Después, un cliente lo comprueba en la estación de servicio y su equipaje se traslada a un transportador de entrega quien lo lleva hasta el sistema de manipulación de equipajes.

Sistemas informáticos especializados para ofrecer un mejor servicio a los clientes y disminuir tiempos en el transporte de equipaje, se han desarrollado con el fin de optimizar la operación del manejo de equipaje; entre estos existe por ejemplo, una algoritmia que genera información sobre la restricción de capacidad, para planificar las operaciones de facturación basado en horarios de llegada de vuelo y estimando además las condiciones de funcionamiento de entrada del equipaje, de tal manera que no se produzcan bloqueos en las estaciones de check-in, y se pueda reducir al mínimo el tiempo de viaje del equipaje, maximizando a la vez las medidas de desempeño del sistema.

Con todo lo anterior, se puede observar, que un aeropuerto está expuesto a diferentes riesgos, ya sean de tipo atmosféricos o por planeación en alguna de sus áreas, por tanto se esfuerza por afrontar estos y otros desafíos desarrollando diferentes herramientas y metodologías que faciliten la labor de pronóstico de demanda, planeación de recibo de paquetes, almacenamiento, manejo de equipaje, distribución de mercancías, asignación de flotas, manejo de personal, rápida respuesta ante una eventualidad, entre otros, con el fin de satisfacer los requerimientos del cliente.

---

<sup>30</sup> CREIGHTON Doug, NAHAVANDI Saeid, IEEE y LE Vu T. Simulation- based input loading condition optimization of airport baggage handling systems. En: Intelligent transportation systems conference. Seattle, WA, USA, Sept 30- Oct 3, 2007.

#### 4.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Un modelo es una representación ideal de un sistema y la forma en que este opera, está enfocado en analizar el comportamiento del mismo o bien predecir su comportamiento futuro. Los modelos no son tan complejos como el sistema mismo, de tal manera que se hacen las suposiciones y restricciones necesarias para representar las porciones más relevantes del ente analizado. Claramente no habría ventaja alguna de utilizar modelos si estos no simplificaran la situación real. En muchos casos se puede utilizar modelos matemáticos que, mediante letras, números y operaciones, representan variables, magnitudes y sus relaciones.

Todo proceso de optimización requiere de la realización de cuatro etapas:

- Definición del problema: Es importante tener un conocimiento detallado de cada uno de los componentes que forman el sistema como de las interacciones existentes entre ellas.
- Creación del modelo: Se realiza con el fin de reproducir el comportamiento histórico del sistema y de poder evaluar el comportamiento que este tendría frente a diferentes hipótesis que pueden establecerse. Hay que tener en cuenta que un modelo de optimización matemática consta de:

- a. Variables de decisión y parámetros

Las variables de decisión son incógnitas que deben ser determinadas a partir de la solución del modelo. Los parámetros representan los valores conocidos del sistema o bien que se pueden controlar.

- b. Función Objetivo

La función objetivo es una relación matemática entre las variables de decisión, parámetros y una magnitud que representa el objetivo o producto del sistema. Resolver un problema de optimización, según Ramos et al.<sup>31</sup>, consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función

---

<sup>31</sup> RAMOS, Andres ; BEGOÑA, Vitoriano. Modelos Matemáticos De Optimización” [en línea]. Universidad Pontificia Comillas. Madrid. 2010. [Consultado el 26 de octubre de 2013]. Disponible en Internet: <[http://www.iit.upcomillas.es/aramos/presentaciones/t\\_mmo\\_M.pdf](http://www.iit.upcomillas.es/aramos/presentaciones/t_mmo_M.pdf)>.

objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones, donde los modelos de programación lineal son unos de los más utilizados pudiendo abarcar la modelización de prácticamente cualquier tipo de actividad humana.

### c. Restricciones

Las restricciones son relaciones entre las variables de decisión y magnitudes que dan sentido a la solución del problema y las acotan a valores factibles. Por ejemplo si una de las variables de decisión representa el número de empleados de un taller, es evidente que el valor de esa variable no puede ser negativo.

- Elección de una medida de eficacia que abarque y defina el objeto que debe optimizarse.
- Elección de un método que permita obtener el valor óptimo al aplicarlo a la resolución del modelo.

La optimización, sirve para encontrar la respuesta que proporciona el mejor resultado, con la que se puede obtener mayores beneficios, menores costos, frente a las múltiples soluciones locales que pueden existir. Con frecuencia, estos problemas implican utilizar de la manera más eficiente los recursos, tales como: dinero, tiempo, maquinaria, personal, etc.

En las últimas décadas, la optimización logística ha tomado mayor popularidad. Las mejoras en la potencia de cálculo, modelización en software y la voluntad de las empresas a invertir tiempo en el esfuerzo de modelado han permitido que los modelos de optimización que antes eran difíciles de manejar, ahora se puedan tratar más rápidamente. Esto ha llevado a una difusión por parte de los directores de logística acerca de las potenciales ventajas de la utilización de la optimización.

El alcance de la optimización de la logística en las empresas y organizaciones se ha ampliado para abordar, toma de decisiones tácticas, operativas y de colaboración estratégica, con la simple y sencilla utilización de las hojas de cálculo potencializadas con optimizadores y programación de algoritmos.

Para concluir este marco de referencias vale mencionar, y según Bartolacc et al.<sup>32</sup>, que aunque el uso de la optimización de la logística ha crecido enormemente, su aplicabilidad en áreas diferentes e incluso de manera interdisciplinaria queda por explorar permitiendo aún más alcanzar un rol aún más grande y exitoso en la gestión de empresas.

---

<sup>32</sup> BARTOLACC, I Michael, LEBLANC Larry, KAYIKCI , Yasanur & GROSSMAN, Tomas. Modeling for logistics: Options and implementations. EN: Journal of business logistics, , 33(2). 2012. p. 118-127.

## 5. DESARROLLO METODOLÓGICO

### 5.1 FASE PRIMARIA

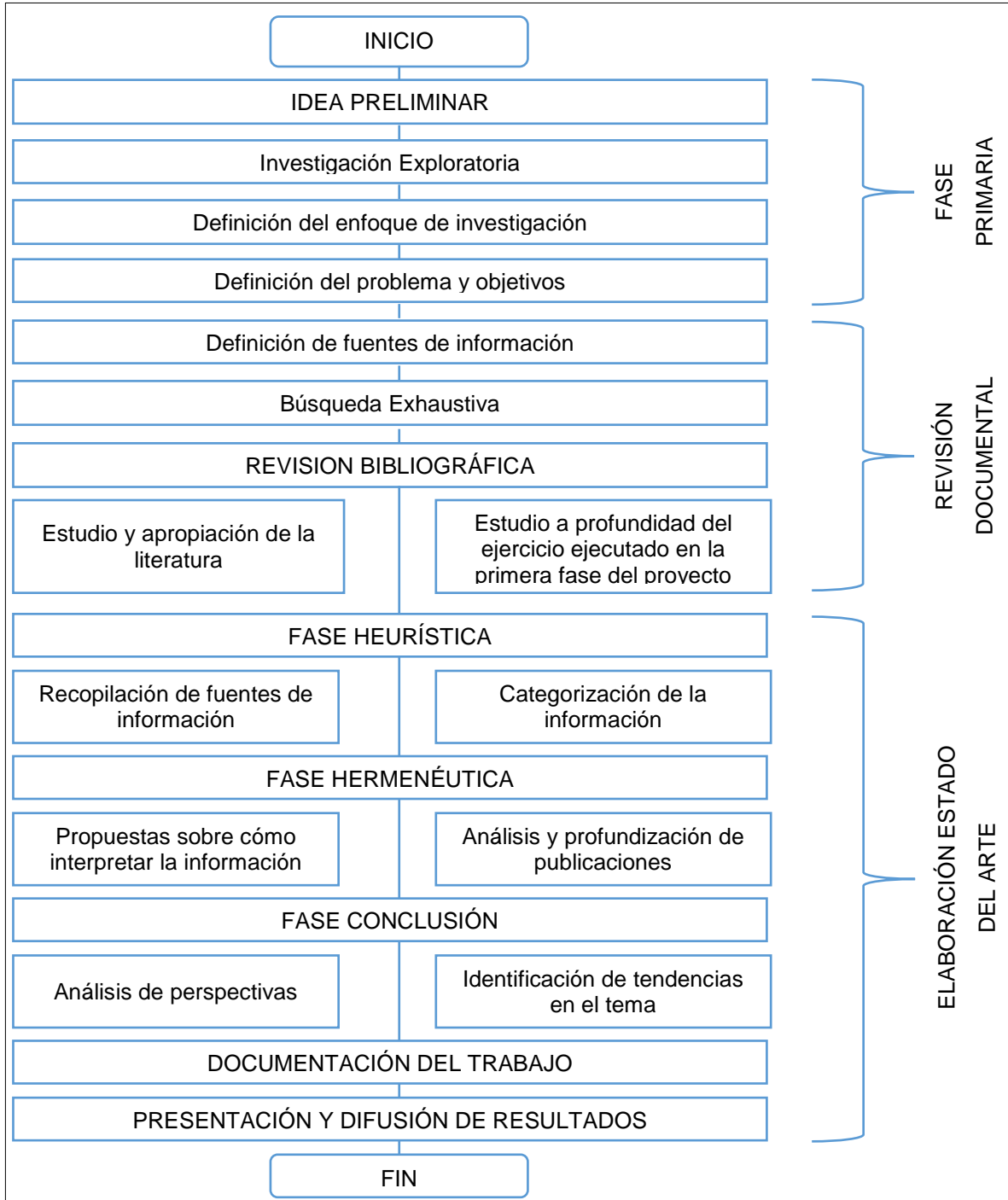
La elaboración de la tesis de grado se divide en tres etapas. La primera etapa abarca desde una idea preliminar, hasta la definición del problema y objetivos de la investigación. La primera fase inicia con una idea propuesta por el profesor Javier Eduardo Arias Osorio, que consiste en buscar los modelos de optimización que se emplean en la logística aeroportuaria, para tal efecto el profesor decide iniciar una investigación con respecto al tema en donde encuentra modelos de optimización que han venido sido abordados en el área aeroportuaria, por tal razón se decide dar inicio al desarrollo de este proyecto para profundizar más sobre la información que se tiene. Luego de ésta búsqueda inicial, se procedió a establecer el enfoque del proyecto el cual se definió como la elaboración del estado de arte de los modelos de optimización en la logística aeroportuaria (véase **Figura 3**).

Previamente se continuó con la definición del problema, factores a tener en cuenta dentro de la investigación y la construcción de objetivos generales y específicos. En esta sub-fase se estableció que al realizar un estado del arte sobre los modelos de optimización en la logística aeroportuaria, tiene como objetivo general obtener un análisis detallado de la evolución, tratamiento actual y tendencias del tema con el fin de identificar oportunidades de investigación, así como también cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión de la literatura sobre modelos de optimización en logística aeroportuaria.
- Realizar una inmersión teórica en la conceptualización de los aspectos relacionados con la temática planteada.
- Analizar los resultados de la revisión de la literatura, clasificando e integrando los diferentes avances, planteamientos, propuestas y desarrollos relacionados con los modelos de optimización en logística aeroportuaria.

- Enmarcar el análisis de la revisión de la literatura al contexto latinoamericano.
- Elaborar un artículo publicable que enmarque los principales resultados del trabajo de investigación.

**Figura 3.** Diagrama general del proyecto



## 5.2 REVISIÓN DOCUMENTAL

Para el cumplimiento del primer objetivo específico, se realizó una búsqueda exhaustiva de información acerca del tema en diversas fuentes y textos relacionados a nivel mundial y latinoamericano, esta búsqueda se organizó de modo cronológico y orden temático, posteriormente se realizó una revisión bibliográfica, para así determinar la información relevante para el desarrollo de la investigación. Para esta fase, se tuvieron en cuenta las siguientes fuentes de información.

### 5.2.1 Referentes teóricos.

- EBCO Host

Es una base de datos de información científica<sup>33</sup> que está basado en una aplicación informática accesible vía web, que suministra el texto completo y/o resúmenes de artículos de revistas científicas, libros de referencia y otros tipos de publicaciones de un variado conjunto de disciplinas, actualizadas periódicamente.

- ProQuest

Reconocida base de datos con un contenido que ahora abarca 90 mil fuentes autorizadas, 6 mil millones de páginas digitales y abarca seis siglos. Incluye la mayor colección del mundo de las disertaciones y tesis; 20 millones de páginas y tres siglos de periódicos a nivel mundial, nacional, regional y de la especialidad; más de 450.000 libros electrónicos; ricas colecciones agregadas de las revistas especializadas más importantes del mundo y publicaciones periódicas; y bóvedas únicas de colecciones históricas digitalizadas de grandes bibliotecas y museos, así como de organizaciones tan diversas como los Archivos Reales, la Associated Press y la Asociación Nacional para el Avance de la Gente de Color.<sup>34</sup>

---

<sup>33</sup>Romero-Torres, M (2012). Mauricio Romero-Torres, Alberto Acosta, ed. *Conocimiento Científico Permeando la Política Ambiental*. <http://books.google.com.co/books?id=XZ-s7UDFMrsC>: Pontificia Universidad Javeriana.

<sup>34</sup> Información tomada de <http://www.proquest.com/> consultado el 23 de junio de 2014.

- Web of Science<sup>35</sup>

Base de datos multidisciplinaria con acceso referencial a información científica internacional, editadas por el Institute for Scientific Information (ISI). Cubre todas las áreas del conocimiento.

Base de datos líder en la citación con la cobertura multidisciplinar de más de 10.000 revistas de alto impacto en las Ciencias, Ciencias Sociales y Artes y Humanidades, así como la cobertura de los procedimientos internacionales de más de 120.000 conferencias. Las potentes herramientas incluyen búsqueda de referencias citadas, Citation Maps y la herramienta de análisis.

- Scopus

Es una base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas. Cubre aproximadamente 18.000 títulos de más de 5.000 editores internacionales, incluyendo la cobertura de 16.500 revistas revisadas por pares de las áreas de ciencias, tecnologías, medicina y ciencias sociales, incluyendo artes y humanidades<sup>36</sup>. Está editada por Elsevier y es accesible en la web para los suscriptores. Las búsquedas en Scopus incorporan búsquedas de páginas web científicas mediante Scirus, también de Elsevier, y bases de datos de patentes.

### **5.3 DESARROLLO DE LAS FASES DEL ESTADO DEL ARTE**

La tercera fase inicia a través de la interpretación, análisis y clasificación de la información proporcionada por las fuentes, con el fin de ir huella tras huella en el trascurso de la investigación. Inicialmente se dispone a realizar una revisión de los antecedentes sobre los modelos de optimización en logística aeroportuaria, con el fin de clasificarlos y facilitar su identificación.

---

<sup>35</sup> UIS. Web of science. [consultado en junio de 2014]. Disponible en internet <<www.uis.edu.co/webUIS/es/Index.jsp>>

<sup>36</sup> SCOPUS. Elsevier. Scopus in detail: What does it cover?.[Consultado en junio de 2014].

**5.3.1 Fase Heurística.** Para desarrollar una Investigación Documental del tipo de Estado del Arte, es necesario diseñar y aplicar dos fases que corresponden al tratamiento adecuado de los textos que son objeto de estudio.

Las dos fases generalmente se ubican en las primeras etapas de cualquier Investigación Documental. El primer momento está compuesto por una fase heurística. Durante el proceso se buscaron y recopilaron distintas fuentes de información que brindaron un número significativo de ejemplares documentales. Estas fuentes de información fueron bibliografías, bibliotecas, bases de datos, archivos físicos, revistas científicas, otros Estados del Arte, etc. La información obtenida se clasificó a criterio propio, donde los artículos fueron agrupados de acuerdo a los modelos de optimización que se empleaban en cada una de las áreas del aeropuerto (pasajeros, equipaje, mantenimiento, etc). En este punto, se emplean diferentes recursos e instrumentos de diferentes vías para cumplir los fines. Para este caso, se empleó el recurso de la Sistematización para categorizar la información dentro de los Estados del Arte. Este proceso requirió del empleo de diferentes instrumentos, por ejemplo: matrices de análisis, fichas categoriales, mapas o adunas conceptuales, etc.

Es entonces como en esta etapa de búsqueda y recopilación de la información, donde se pretende tener una información actualizada en las publicaciones de los modelos de optimización en logística aeroportuaria, que se procedió a desarrollarlo de la siguiente forma:

En primera instancia, la actualización de las publicaciones se inició con la búsqueda de artículos científicos en el área de modelos de optimización en logística aeroportuaria en la base de datos internacional *ISI Web of Science*<sup>37</sup>. Las ecuaciones de búsqueda utilizadas fueron establecidas en la primera fase del

---

<sup>37</sup>Base de datos de la firma Thomson Reuters que integra tres bases de datos de revistas académicas a saber: Science Citation Index (SCI), Social Sciences Citation Index (SSCI), y Arts and Humanities Citation Index (AHCI) ofreciendo una amplia cobertura sobre investigación multidisciplinaria publicada en revistas líderes mundiales de la ciencias, las ciencias sociales, artes y humanidades.

proyecto (**anexo B**), las cuales se ingresaron a la base de datos, teniendo en cuenta los campos de información que se muestran a continuación.

**Tabla 1.** Campos a incluir en la búsqueda de publicaciones

ISI Base de Datos Científica	
<b>Author</b>	Publisher Information
<b>Abstract</b>	Source
<b>Addresses</b>	Document type
<b>ISSN</b>	Keywords
<b>Title</b>	Language
<b>Cited References</b>	Subject category

Inicialmente, se realizó el análisis bibliométrico para cada una de las ecuaciones de búsqueda con el fin de poder observar el comportamiento del temático específico (**anexo C**). Esto se logró por medio del procesamiento de las búsquedas realizadas en el software *vantagepoint*, herramienta que dio como resultado los datos estadísticos con los cuales se construyeron las gráficas de los indicadores mencionados anteriormente.

Con el fin de estudiar el comportamiento general del área, se unieron las ecuaciones de búsqueda mencionadas anteriormente y se procesaron en el software. A partir de esto se realizó el análisis bibliométrico, que tuvo en cuenta los siguientes ítems:

- Indicadores bibliométricos: Con los datos estadísticos obtenidos se elaboraron cuatro gráficos en los que se muestra la dinámica de publicación y el ranking 10 para países, instituciones y revistas.
- Matrices de correlación: son cruces asimétricos de dos (2) variables o campos diferentes. Su principal ventaja es que ofrecen una visión más amplia que la

que evidencia un indicador por sí solo y permiten hacer uso de la información disponible para conocer a profundidad la dinámica del sistema de estudio.

- Red de conocimiento: Se elaboró una red con un grado de profundización mayor, donde se tomaron como insumo los 5 países más importantes del área y posteriormente, se analizó en cada caso las instituciones con mayor número de publicaciones asociadas y las revistas con mayor número de artículos indexados

En el **anexoD** se muestran las matrices que relacionan: países Vs categoría, países Vs revistas, palabras clave Vs años y categoría Vs años

**5.3.2 Fase Hermenéutica.** Después de que concluye la fase heurística, se requiere principiar un proceso o fase hermenéutica.

Este procedimiento se desarrolla con el fin de proponer rutas para interpretar la información encontrada y organizada en la investigación. En este sentido, González<sup>38</sup> se refiere al tratamiento hermenéutico como una actividad de análisis que comienza desde “lo superficial” y se conduce hasta “lo profundo”. La autora se refiere en este punto a comprender la relación de lo escrito con su sentido. Así, la fase hermenéutica fomenta la comprensión de un todo en relación con sus partes. Por ejemplo, durante la fase hermenéutica se pretende develar el sentido de las estructuras que constituyen cada documento en relación a la hipótesis que plantea el Estado del Arte. Así, por ejemplo, si estamos estudiando artículos de investigación, podría establecerse la categoría “Alcance de los Objetivos” para determinar si en un determinado conjunto de artículos se cumplen con los parámetros mínimos para llevar a cabo un nivel de investigación pertinente, de acuerdo al planteamiento de unos objetivos generales y específicos —los criterios para medir la pertinencia dependen de los estándares que ofrecen diferentes teorías y del campo de conocimiento en el cual se desarrolla la investigación—.

---

<sup>38</sup> GONZÁLEZ, Elvia M. Sobre la hermenéutica o acerca de las múltiples lecturas de lo real. Medellín: Universidad de Medellín, 2006. P. 99.

Para González realizar un proceso hermenéutico debe estar orientado a la comprensión. Es decir, develar el sentido de las estructuras textuales de un grupo documental pierde relevancia si no se prevén algunos objetivos claros que permitan orientar la fase hermenéutica al interior de la investigación. En otras palabras, entender los contenidos de un conjunto de textos debe revelar algunos datos pertinentes que abran nuevos espacios de estudio y constituyan nuevas perspectivas de análisis en un campo específico del conocimiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace una profundización de análisis en las publicaciones con el fin de poder identificar las líneas estratégicas del área a través de los insumos recibidos anteriormente.

Como resultado de la fase hermenéutica, la definición de 5 líneas de investigación a impulsar en el área de modelos de optimización en logística aeroportuaria. Estas fueron:

- Operations Research & Management Science
- Engineering and Logistics Software
- Transportation Air
- Business & Economics
- Instruments & Instrumentation

Se estudiaron los resultados obtenidos en la primera fase y se determinó la pertinencia de incluir líneas de investigación que abarcaran el campo de control de tráfico aéreo, teniendo en cuenta que el enfoque investigativo debe apuntar a ofrecer información integral, incluyendo todas las áreas.

De acuerdo a este nuevo enfoque, fue necesario complementar el ejercicio de la fase heurística incluyendo las temáticas referentes al componente de tráfico aéreo. Finalmente se obtuvo la definición de 6 líneas de investigación adicionales que se muestran a continuación:

- Aircraft control
- Airline crew scheduling
- Models and simulations
- Air traffic management
- Passenger flow
- Maintenance Routing

## IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS ESTRATÉGICAS

Teniendo como insumo once (11) líneas de investigación, la siguiente fase tuvo como reto inicial refinar esta nueva propuesta, y convertirla en un grupo de líneas estratégicas.

Para llevar a cabo este objetivo, se realizó una revisión exhaustiva de palabras clave para cada línea de investigación (Ver **anexo E**), con el fin de crear sus respectivas ecuaciones de búsqueda. Es importante mencionar que se hizo un filtro preliminar de estas palabras en donde solo se tuvieron en cuenta aquellas que fueron efectivas, para cada una de las ecuaciones de búsqueda final. Este filtro se realizó de la siguiente manera:

- Se elaboró una ecuación de búsqueda para cada una de las palabras clave encontradas inicialmente. A continuación se ilustra un ejemplo:

**Tabla 2.** Ecuación de búsqueda

Línea de Investigación Transportation Air	
Ecuación de búsqueda	Tema: ("Algorithm" AND " aircraft" AND "optimization")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014

- Se seleccionaron como efectivas las palabras pertenecientes a las ecuaciones que arrojaron resultados importantes. Estas fueron el insumo para elaborar las ecuaciones de búsqueda final(ver **anexo F**).

Estas ecuaciones de búsqueda se ingresaron en la base de datos *ISI Web of Knowledge* con fecha de corte 2001 – hasta la fecha, para generar los reportes dinámica de publicación y citación en el software *vantage point*. Todo el análisis se realizó con el fin de evaluar el comportamiento de la investigación (Ver **anexoG**).

## **IDENTIFICACIÓN DE SUB-LÍNEAS PARA CADA LÍNEA ESTRATÉGICA**

El proceso de planeación incluyó cuatro (4) etapas que se presentan a continuación:

### a) Análisis de palabras clave –*Key Words*–

La información de cada una de las 5 líneas estratégicas se obtiene a través de la exportación a un archivo plano (.txt), desde la base de datos *ISI Web of Science*. Dichos archivos están en un formato compatible con el software *Vantage Point*, que fue utilizado para el procesamiento de datos y que generó un listado de palabras clave asociadas a cada línea (Ver **anexoH**). Este primer ejercicio arrojó como resultado un extenso listado que no permitió la organización de las palabras y las palabras clave no describían de manera efectiva el objetivo de este análisis. La falta de resultados obligó a descartar la metodología anterior y reiniciar el ejercicio.

### b) Análisis de frases clave del título –*NLP Phrases*–

Las frases en lenguaje natural (NLP, por sus siglas en inglés) son frases extraídas del título de cada artículo, de manera que se pueda obtener información valiosa como: temáticas específicas, técnicas de procesamiento utilizadas, entre otros. Para obtener estas frases se procesaron nuevamente los textos planos en el *Software Vantage Point 6*. De este análisis se identificaron las **principales NLP** (mayor frecuencia de aparición) para cada línea estratégica, obteniendo resultados de mayor precisión y relación con los objetivos de la búsqueda a diferencia del análisis de palabras clave.

c) Análisis de temáticas académicas internacionales

Se consideró importante complementar el análisis de **NLP Phrases** anterior, con las temáticas académicas a nivel mundial. Para ello se revisaron las actas, publicaciones y grupos de interés de referentes mundiales como Transportation Science (Transp. Sci y European Journal Of Operational Reserch (Eur. J. Oper. Res.),

Teniendo en cuenta lo realizado anteriormente, se realiza una **acotación del tema** que consiste en la elaboración de un listado de las áreas específicas de la logística aeroportuaria que constituirán el objeto de estudio, para así poder continuar con la parte final de la elaboración del estado del arte.

### **ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO**

Mediante el análisis de indicadores bibliométricos se observó el comportamiento de la investigación (ver **anexo G**). Los pasos seguidos para realizar este análisis se muestran a continuación:

- a) Se elaboraron ecuaciones de búsqueda con el fin de obtener una visión general, sin sesgar los resultados de la búsqueda.
- b) Se realizó la búsqueda ingresando las ecuaciones en la base de datos ISI Web of Science con fecha de corte 2001 – hasta la fecha y se obtuvo como resultado los textos planos.
- c) Los textos planos fueron procesados en el software Vantage Point para obtener los respectivos indicadores bibliométricos.

**5.3.3 Fase de Conclusión.** Es el punto de la investigación en la que se generan conclusiones y análisis de perspectivas y tendencias en el área de la logística aeroportuaria, y que a la vez puedan contribuir a tomas de decisiones o futuros estudios. Este paso se realiza con el objetivo de contribuir al proceso de investigación del tema y transferirlo.

Así las cosas, a lo largo de este estudio se entenderán el concepto de Estado del Arte como un proceso de investigación documental. La investigación se ha concentrado en el análisis de los últimos desarrollos científicos documentales -del año 2001, en adelante-, cuyo objeto haya sido la aplicación de modelos de optimización en la logística aeroportuaria. Siendo dichos desarrollos probados en la industria aeroportuaria e implementados en diferentes establecimientos. En este sentido, el Estado del Arte se entiende como una investigación documental mixta (cualitativa-cuantitativa) que emplea diferentes métodos de búsqueda, análisis, valoración y validación de la información. De esta manera, se analizarán los documentos científicos publicados desde el 2001 en adelante, que hayan sido patentados y que hayan generado un impacto pertinente en la logística de instituciones aeroportuarias. Además, la investigación tendrá en cuenta algunos enfoques teóricos planteados desde la perspectiva científica de la archivística.

## 6. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se presentan los modelos de optimización en la logística aeroportuaria que fueron encontrados en la literatura. Los modelos aquí expuestos tratan de temas principales como: tráfico aéreo, asignación de tiempo a las aeronaves para el despegue, rodaje de aviones, movimiento en tierra de aeronaves, espera en el aire, entre otros.

### 6.1 MODELO: PROBLEMA DE GESTION DEL FLUJO DE TRÁFICO AÉREO EN EUROPA

La gestión del flujo del tráfico aéreo en Europa tiene que lidiar tanto con las limitaciones de capacidad de las rutas en el espacio aéreo como en las otras limitaciones de capacidad más habituales en los aeropuertos. Lulli G. y Odoni<sup>39</sup>, presentan un modelo de optimización determinístico para el problema de gestión con el flujo de tráfico aéreo europeo (EU ATFM, por sus siglas en inglés – *european air traffic flow management*). El modelo diseña estrategias de gestión de flujo que involucra tanto espera en tierra como en el aire. Se muestra en particular, que en ciertas circunstancias, es mejor en términos de la demora total y costos del retraso, asignar a un vuelo un retraso en la espera aérea así sea más costoso que sí se asigna un retraso en tierra.

**6.1.1 El modelo matemático EU ATFM.** El modelo descrito está diseñado para resaltar los aspectos estratégicos del problema EU ATFM, evitando detalles excesivos y características de segundo orden. Está basado en las siguientes suposiciones:

1. Periodos de tiempos discretos
2. Demanda determinística (el horario de llegada de los vuelos a todos los aeropuertos destino, son conocidos)
3. Capacidad determinística (la capacidad tanto del aeropuerto como del sector son conocidas para cada periodo de tiempo  $t$ )

---

<sup>39</sup>LULLI Guglielmo; ODoni Amedeo. European Air traffic flow management problema. Transportation Science Vol. 41, No. 4, November 2007, pp. 431–443.

4. Ubicación del retraso en el aire
5. Velocidad de viaje igual
6. Sin cambio de ruta
7. Capacidad del sector
8. Secundarias: las salidas pueden quitarse cuando sea necesario desde los aeropuertos de origen; no hay ninguna restricción sobre el número de aeronaves que se puede colocar en cola en el terminal del espacio aéreo

Es importante aclarar que el primer supuesto es típico de casi todos los modelos de ATFM y está de acuerdo con la práctica. Los supuestos 2 y 3 tienen lugar en la categoría "determinista". Los supuestos 4-7, como un grupo, simplifican en gran medida el modelo, haciendo innecesario el seguimiento de aeronaves individuales (o tipos de aviones) o el considerar las distancias entre elementos de la red<sup>40</sup>. Al mismo tiempo, estos supuestos son aproximaciones razonables a la práctica actual. Los controladores de tráfico rara vez planifican con antelación mantener las aeronaves en el espacio aéreo, y los controladores aéreos locales mantienen la ruta sólo por razones tácticas. En el supuesto 4, prácticamente todas las esperas en el aire, estén o no planeadas, se llevan cerca del terminal del espacio aéreo. El supuesto 5 también es una buena aproximación de las condiciones actuales cuando se aplica a los turboreactores, que casi exclusivamente, se encuentran a gran altura en sectores de ruta y constituyen la gran mayoría de las aeronaves en los aeropuertos de mayor actividad comercial. El supuesto 6, es inusual en Europa por razones técnicas, así como por el "efecto dominó" que el cambio de ruta de un vuelo puede tener en otros vuelos.

Cuando se selecciona la longitud de unidades de tiempo apropiada, la definición de la capacidad del sector en ruta del supuesto 7 es más o menos equivalente a establecer la capacidad igual al número de aeronaves que pueden ocupar un sector al mismo tiempo, que es la definición más convencional. Finalmente, las

---

<sup>40</sup> RICHETTA, O., ODONI A. Solving optimally the static ground- holding policy problem in air traffic control.2004. Transportation Science, vol. 27.p. 228–238.

simplificaciones en el supuesto 8 son típicos de aquellos hechos (a menudo sin que se indique explícitamente) en modelos de un alcance estratégico similar a la del modelo EU ATFM. Si no se hace, estos supuestos producirían sólo perturbaciones "de segundo orden" a los resultados, al tiempo que complican en gran medida el análisis.

Como consecuencia de los supuestos 1-8, sólo dos variables de control están asociadas a cada vuelo: la cantidad atribuida de demora en tierra antes del despegue en el aeropuerto de origen y la cantidad de retardo en el aire asignado para ser tomado en el espacio aéreo cerca del aeropuerto de destino<sup>41</sup>. Este modelo puede ser considerado como una "versión microscópica", al modelo presentado por Bertsimas y Stock Patterson en 1998<sup>42</sup>, en que omite ciertos detalles de este último. Su función objetivo también es diferente. Bertsimas y Stock Patterson se caracterizan por el uso de un conjunto alternativo de variables de decisión que conducirá a soluciones rápidas de los programas enteros resultantes. Mediante la adopción de un bajo nivel de detalle y una formulación sencilla, el modelo UE ATFM está en mejores condiciones para destacar las características críticas que podrían resultar más importantes en la práctica del entorno UE ATFM.

Sin embargo, en el 2000 Bertsimas y Stock Patterson<sup>43</sup> extendieron su modelo para cubrir la posibilidad que las rutas de vuelo pudieran variar de según el nivel de congestión en el sistema. El espacio de decisión en este caso se convierte en uno mucho más grande, de modo que las variables agregadas y métodos aproximados se deben emplear para resolver problemas de tamaño realista. Por el contrario, el modelo ATFM UE, de acuerdo al supuesto 6, no permite variar rutas de vuelo, como se ha discutido anteriormente.

---

<sup>41</sup> VOSSEN, T., M. O. Ball. Optimization and mediated bartering models for ground delay programs. *Naval Res. Logist.*, vol. 53. 2006.p. 75–90.

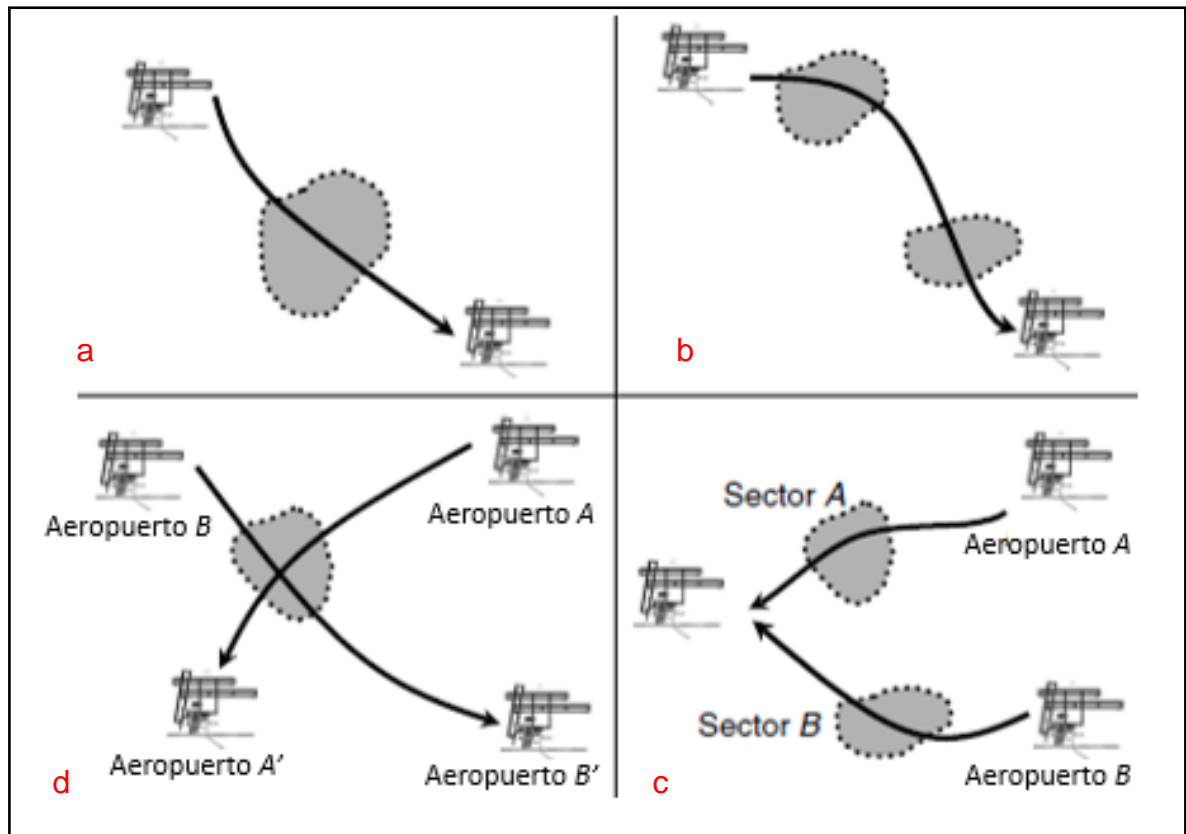
<sup>42</sup> BERTSIMAS, D., STOCK Patterson. The air traffic management problem with enroute capacities. *Oper. Res.*, vol. 46. 1998. p. 406–422.

<sup>43</sup> BERTSIMAS, D., STOCK Patterson. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach. *Transportation Sci.*, vol. 34.2000. p. 239–255.

**6.1.2 Características de las soluciones para EU ATFM.** Se presentan 4 casos genéricos que ilustran las características de las soluciones para los problemas EU ATFM.

Se examinaron los siguientes 4 casos (véase la **Figura 4**) para comprender mejor las características de las soluciones para los problemas EU ATFM e ilustrar las consecuencias de la capacidad del sector y la estructura de la red:

**Figura 4.** Instancias del problema *EU ATFM*



**Fuente:** BERTSIMAS, D. and STOCK, S. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach. *Transportation Sci.*, vol. 34. 2004. p. 239–255.

- Sector individual: todos los vuelos entrando al aeropuerto destino tienen que cruzar un solo sector con restricciones de capacidad.
- Sectores múltiples, en serie: todos los vuelos entrando al aeropuerto destino tienen que cruzar dos o más sectores en serie, cada uno con restricciones de capacidad.

- c. Dos sectores paralelos: vuelos entrantes a un aeropuerto desde dos orígenes diferentes, Aeropuerto *A* y Aeropuerto *B*, atraviesan dos sectores diferentes e independientes, cada uno con restricciones de capacidad.
- d. Multiaeropuerto: Dos flujos de vuelo con diferente pareja de origen-destino (*A*, *A'*) y (*B*, *B'*) atraviesan el mismo sector; los dos flujos se denominan como Flujo *AA'* y Flujo *BB'*, respectivamente.

El caso (a) es la configuración más simple (red). Este caso va a demostrar que el uso prudente de espera en el aire, además de la espera en tierra, puede generar grandes beneficios potenciales, es decir, una reducción sustancial de la cantidad total de demoras y de los costes de retardo. Esto es completamente diferente al caso en el que no existen restricciones de capacidad. En este último caso, es bien sabido que las soluciones óptimas, en ausencia de incertidumbre, no incluyen ningún tipo de espera en el aire<sup>44</sup>.

Caso (b) se demuestra que es reducible al caso (a) bajo el supuesto número 2 (anteriormente mencionado). Los casos (c) y (d) son configuraciones de red más verdaderas, ya que implican interacciones entre los diferentes flujos de tráfico que compiten por el acceso a los recursos comunes. Además de explorar más a fondo las características de soluciones UE ATFM, estos dos casos se utilizarán para enfatizar la fuerte posibilidad de que este tipo de soluciones pueden violar las nociones fundamentales de la "justicia" y de trato equitativo de todos los usuarios de la red. El modelo UE ATFM ha sido probado en casos basados en la demanda del aeropuerto de Malpensa de Milán (MXP)<sup>45</sup>. Los datos del programa de aviones, proporcionados por ENAV, Autoridad Control de Tráfico Aéreo de Italia, representan un día de semana típico de operaciones. Un total de 368 llegadas están programadas desde 05 a.m. a 11 p.m., hora local. Este lapso de 18 horas se divide en 72 unidades de tiempo de 15 minutos. En la Figura 5, se indica el

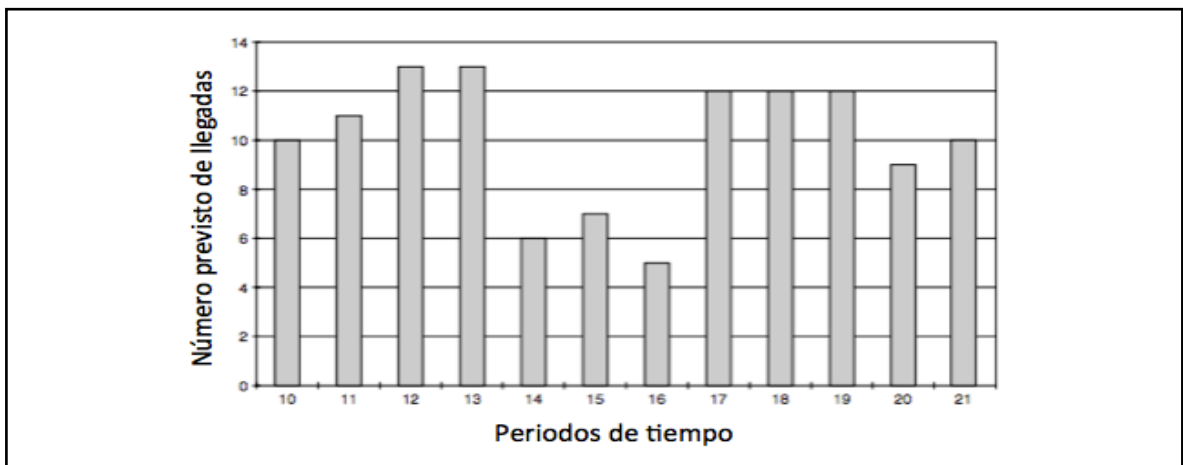
---

<sup>44</sup> TERRAB, M., ODONI A. 1993. Strategic flow control on an air traffic network. Oper. Res. 41 138-152.

<sup>45</sup>Performance Review Commission. 2004. Performance Review Report 2004, European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), Brussels, Belgium.

aterrizaje programado por unidad de tiempo entre 7:30 am -10:30 am, allí se muestra el periodo de mayor actividad del aeropuerto. En promedio, 40 llegadas por hora están programados. La unidad de tiempo 10 que corresponde con el período de 15 minutos comenzando a las 7:30 am, y así sucesivamente. La demanda de aterrizajes en MXP refleja el *hub and spoke* de operaciones en el aeropuerto, donde los períodos con un gran número de llegadas se alternan con períodos con un gran número de salidas. El patrón de demanda de la **Figura 5** es el que se utiliza en todo el análisis experimental. Para mejorar la capacidad, medida como el número de llegadas permitidas por unidad de tiempo, se utilizaron varios valores diferentes, que abarcan una variedad de condiciones climáticas. La capacidad máxima de aterrizaje de MXP es de 46 aviones por hora (o 11,5 por unidad de tiempo), pero puede ser considerablemente menor si el clima no es el ideal. Para el periodo de 7:30 am - 10:30 am, la demanda promedio de llegada por hora es igual al 87% de la capacidad máxima de aterrizaje, por lo que no es poco "malo", incluso con buen tiempo.

**Figura 5.** Demanda de aterrizajes en MXP (7:30-10:30 am Hora Local)



**Fuente:** LULLI, Guglielmo y ODoni, Amedeo. The European Air Traffic Flow Management Problem. *En: Transportation Science*. Noviembre, 2007. vol. 41, no. 4, p. 431-443.

**6.1.3 Hallazgos e implicaciones.** El modelo considera limitaciones de aeropuerto y del sector en ruta, y asigna retrasos a vuelos tanto en tierra como en aire. El modelo se aplicó en varios ejemplos basados en cuatro configuraciones de red genérica para demostrar las siguientes características importantes de solución al problema EU ATFM:

- Las soluciones involucran combinaciones complejas de espera aérea y terrestre.
- En muchos casos, el retraso total o el costo del retraso total puede ser reducido significativamente al asignar retrasos en la espera aérea a ciertos vuelos en vez de retrasos en tierra, a pesar de que estos últimos son menos costosos por unidad de tiempo.
- Como resultado de su estructura de red, el problema UE ATFM da lugar a conflictos fundamentales entre soluciones eficientes (en el sentido de minimizar alguna función de los costos totales de retraso), y equitativas (en el sentido de manejar usuarios de la red en un orden FSFS, u otra disciplina prioridad similar, con respecto al acceso a los recursos). A pesar de que el modelo de la UE ATFM está diseñado para distribuir los costos de retraso de manera uniforme entre los usuarios con similares características (por ejemplo, los vuelos que viajan entre los mismos dos aeropuertos en rutas idénticas), las soluciones eficientes pueden discriminar sistemáticamente, por ejemplo, los aviones que viajan en ciertas rutas, procedente de o que terminan en ciertos aeropuertos, o vuelan en determinados momentos.

## **6.2 MODELO: MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE COLABORACIÓN PARA EL RODAJE EN TIERRA BASADO EN LA PRIORIDAD DE LAS AERONAVES**

El problema principal es que la mayoría de las aerolíneas y prestadoras de servicios de tránsito aéreo hacen la planificación de sus vuelos (salida y llegada) asumiendo buenas condiciones climáticas, pues suponen que las tasas de llegada y salida disponibles no se limitarán por cualquier motivo que no sea las limitaciones de la pista o de seguridad.

Además de la planificación ajustada, la naturaleza puesta en cola de las operaciones de superficie implica que hay suficientes aviones para asegurar un depósito de la demanda de despegue constante- en la pista.

En consecuencia los grandes aeropuertos son muy sensibles a los acontecimientos inesperados que alteran la capacidad de rendimiento. La congestión ocurre como una combinación natural de planificación de la operación ajustada y los acontecimientos imprevisibles (por ejemplo el mal tiempo que resulta en un cierre de la primera fijación, es decir, el cierre de una ruta de salida en la terminal de control). En aeropuertos de mucho tráfico, como el aeropuerto de Atlanta, no es raro tener colas de 30 o 45 aviones esperando para el despegue en umbrales de pista.

Para hacer frente a la congestión, la FAA (Federal Aviation Administration), los aeropuertos y las compañías aéreas tienen varias opciones:

- 1) Pueden tratar de eliminar la congestión a través de:
  - a) Aumento físico de su capacidad (construcción de más pistas de aterrizaje, o mediante el uso de tecnología de radar para vigilar wake-vortex y reducir las restricciones de separación de la aeronave).
  - b) Realizar las planificaciones de la salida, de acuerdo a las restricciones de espacio.
- 2) También se pueden optimizar las operaciones a través de:
  - a) Centralización de las operaciones en torno a las autoridades aeroportuarias para facilitar la colaboración, optimizar el rendimiento y reducir las ineficacias.
  - b) El uso de la toma de decisiones en colaboración (CDM) para mejorar las operaciones, respetando el entorno competitivo.

Sin embargo, la solución 1a) para A. Karp<sup>46</sup>, donde se indica el aumento de capacidad de los aeropuertos, no siempre es aplicable. Por ejemplo, en

---

<sup>46</sup>KARP, A. Size Matters at LaGuardia [online]. Air Transport World [Cited August de 2014].

Nueva York La Guardia, no hay suficiente espacio para agregar cualquier pista. Incluso en su caso, la demanda de tráfico se mantendría alta y la congestión se reduciría, pero no quedaría suprimida. Para el caso de aplicar la solución 1b), haciendo uso de las restricciones de espacio, es suficiente para evitar la sobrecarga de horario; pues de este método se conoce que es necesario en algunos casos, ya que en la actualidad hay 4 aeropuertos con controladores de espacio, regulados por el gobierno federal (Nueva York La Guardia, Nueva York JFK, Reagan Washington National, y Chicago OHare<sup>47</sup>) y con ello se previene situaciones de gran congestión que podrían afectar a todo el Sistema Nacional del Espacio Aéreo. Sin embargo el espacio restringido de aeropuerto, debe asumir una tasa de salida constante que sólo puede lograrse en condiciones de buen tiempo. En otras palabras, las restricciones de espacio no evitan las interrupciones no planificadas de rendimiento provocados por eventos tales como cambios frecuentes en la dirección del viento (que empujan a la torre de control del aeropuerto para cambiar de configuración varias veces durante un corto período de tiempo), programas de demoras en tierra, o simplemente cierres debido al mal tiempo.

El punto 2a), que señala la centralización de las operaciones en torno a las autoridades aeroportuarias para facilitar la colaboración, da mucho poder a las autoridades de los aeropuertos y los proveedores de servicios de tránsito aéreo. Esta solución está lejos de las operaciones habituales en los aeropuertos, sobre todo los aeropuertos de los Estados Unidos que tienen operaciones muy descentralizados, indican N. Pujet, B. Delcaire y E. Feron<sup>48</sup>. De hecho las compañías aéreas privadas controlan su rampa de operaciones hasta que los aviones están preparados para su pushback. La torre de control da autorización a

---

<sup>47</sup> Airport Collaborative Decision Making. EUROCONTROL, [http://www.eurocontrol.int/airports/public/standard page/APR2 ACDM.html](http://www.eurocontrol.int/airports/public/standard%20page/APR2%20ACDM.html), 2007. [Consultado en agosto de 2014].

<sup>48</sup> N. Pujet, B. Delcaire, and E. Feron. Input-output modeling and control of the departure process of congested airports. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02140, 2009.

las aerolíneas para hacer retroceder en un primer momento, tan pronto como el avión pueda empujar y salir de la rampa. En consecuencia, los intentos de tomar el control de las secuencias de *push-back* y recursos terrestres enfrentan gran resistencia por parte de las compañías aéreas. Además, las operaciones de centralización reducen el conjunto de responsabilidades de las líneas aéreas privadas y suprime el medio ambiente de *laissez-faire*. Por lo tanto, reduce los incentivos de mercado libre que ayudan a mejorar continuamente las operaciones y adaptar los servicios a las necesidades de los pasajeros.

Por su parte, el punto 2b) con el uso de CDM puede ayudar al aeropuerto para llegar a una solución intermedia, que no va a centralizar las operaciones. Este segmento estudia los beneficios potenciales de CDM aplicados a las operaciones en tierra durante las situaciones de congestión. CDM ya ha demostrado su eficacia en la gestión del flujo con la salida de los horarios de vuelo (FSM), indica Mohleji and Tene<sup>49</sup>. De hecho, FSM es un sistema cuya función principal es la de poner en práctica programas de demoras en tierra cuando, en un aeropuerto, la demanda de llegada supera capacidad de llegada. Según Mohleji and Tene<sup>50</sup>, el FSM, es de vital importancia, pues permite a las aerolíneas reprogramar sus “vuelos colaboración” para adaptar la demanda de la llegada a su capacidad de llegada en el aeropuerto. El entorno competitivo juega un papel importante. En la mayoría de los aeropuertos, las líneas aéreas compiten para satisfacer tanto su desempeño en puntualidad, así como para utilizar los recursos de los aeropuertos. Por lo tanto, en ausencia de regulación de la política, las líneas aéreas reaccionan con una capacidad limitada al tratar de hacer retroceder a sus aviones en la cola lo más pronto posible. Una vez que los aviones están haciendo cola en el sistema de calles de rodaje, las aerolíneas pierden capacidades de optimización. En

---

<sup>49</sup>Mohleji and Tene. Minimizing Departure Prediction Uncertainties for Efficient RNP Aircraft Operations at Major Airports. The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development, McLean, VA 22102, 2006.

<sup>50</sup>Mohleji and Tene. Minimizing Departure Prediction Uncertainties for Efficient RNP Aircraft Operations at Major Airports. The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development, McLean, VA 22102, 2006.

efecto, por "las carreras de la pista", pierden la opción de cambiar sus vuelos y reorganizar su secuencia de despegue.

Según F. Carr, A. Evans, J.P. Clarke, and E. Feron<sup>51</sup>, para gestionar la congestión, cualquier esquema de optimización de funcionamiento descentralizado primero tiene que encontrar una solución que ofrezca a las aerolíneas motivación para no apilar sus aviones en una pista de aterrizaje. Esto podría lograrse mediante la motivación a las aerolíneas para que mantengan los aviones en la puerta o mediante el uso de estacionamientos adicionales para parquear aviones mientras el sistema de salida está saturado.

El mayor desafío que enfrenta mantener los aviones que están en cola en la calle de rodaje está dado por los requisitos de disponibilidad de espacio para los recién llegados (en la puerta o en la calle de rodaje). Sin embargo, en la mayoría de los aeropuertos, hay dos fenómenos que garantizan que la capacidad de aparcamiento podría ser explotada. En primer lugar, la ocupación de la puerta y el estacionamiento son cíclicas, todos los días hay un momento en que la tasa de llegada es inferior a la tasa de salida, esto crea la capacidad temporal que podría ser utilizado para mantener aviones en pista. En segundo lugar, la capacidad de los aeropuertos crece cíclicamente, cuando se construyen rampas, o la calle de rodaje se prolonga. El aumento repentino de la capacidad de estacionamiento permite más capacidad de retención, especialmente porque la tasa de salida máxima se mantiene sin cambios hasta que se construye una nueva pista de aterrizaje. La congestión siempre va a suceder, sin embargo los conceptos de CDM pueden ayudar a aumentar la flexibilidad de la secuencia de vuelo de salida, dando capacidades de optimización significativas.

---

<sup>51</sup>F. Carr, A. Evans, J.P. Clarke, and E. Feron. Modeling and Control of Airport Queuing Dynamics under Sever Flow Restrictions. International Center for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02140, 2004.

**6.2.1 Cola Virtual de Colaboración.** La Cola Virtual de Colaboración (CVQ) es un mecanismo de colas mediante el cual las solicitudes de push back se apilan en una cola virtual, y los aviones son adheridos a las colas de la pista. Los aviones esperan en la puerta o en los lugares de estacionamiento de asfalto. La cola está sesgada de forma continua por las autorizaciones pushback de los proveedores de servicios de tránsito aéreo que deciden si el sistema de salida puede manejar el tráfico adicional sin sacrificar la seguridad ni el rendimiento. La **Figura 6** ilustra el concepto CVQ.

La Cola Virtual de Colaboración tiene por objeto permitir a las aerolíneas mantener los aviones lejos de las calles de rodaje y las pista de colas saturadas. Al hacerlo, el CVQ crearía capacidades de conmutación de vuelo de último minuto, que las aerolíneas podrían explotar para mejorar sus operaciones de salida en tiempo real. Además, este mecanismo podría aumentar la precisión de las predicciones de tiempo de rodaje, ya que reduciría el número de aviones que están haciendo cola en la calle de rodaje. Como resultado, cuando las operaciones en tierra son competitivas y congestionadas, una CVQ podría ayudar a controlar el nivel de congestión de las calles de rodaje.

**6.2.1.1 Periodo de tiempo.** La cola virtual se puede utilizar para gestionar las aeronaves en la rampa o en el área de rampa entre el tiempo listo para el rodaje y el tiempo de *pushback* o salida de rampa en tiempo real.

Las incertidumbres en los tiempos de rotación son un problema para cualquier proceso de optimización de salida que requiere una previsión precisa para el “*pushbacktime*” de un avión. Carr y Theis<sup>52</sup> describen las limitaciones de la predicción *pushback* en torno a la previsibilidad de tiempo para futuras operaciones, llegando a la conclusión de que los futuros procesos de gestión del tráfico aéreo deben ser diseñados con mecanismos sólidos para hacer frente a las variaciones de tiempo *pushback*.

---

<sup>52</sup>Carr, F., Theis, G., Clarke, J., and Feron., E., Evaluation of Improved Pushback Forecasts Derived from Airline Ground Operations Data. Journal of Aerospace computing, information, and communication, Vol. 2, January, 2005



presentan sus planes de vuelo. Como consecuencia de estas incertidumbres, los aviones se les permite participar en la cola virtual de colaboración sólo después de que hay poca o ninguna incertidumbre acerca de su tiempo de preparación, por ejemplo, cuando el piloto pide el despacho de *pushback* o cuando las puertas están cerradas.

#### **6.2.1.2 Secuencia de las operaciones.**

- Cuando un avión en la rampa pide un *pushback* o una autorización de rodaje a la rampa de salida, la aeronave se mantiene en la puerta o en el punto de salida, si el sistema de calle de rodaje está saturado. Si se necesita la puerta o el lugar de llegada, se mueve a un lugar de estacionamiento alternativo, como una “*penaltybox*”. y se crea una ranura liquidación correspondiente. Este es un espacio virtual de rodaje.
- Una ranura de holgura es un *pushback* y un rodaje de tolerancia flotante que identifica la línea aérea de la aeronave. Contiene el tiempo de eliminación virtual. Se puede incluir cualquier otra información de las aeronaves, que se dirigen a la línea aérea, con respecto a la optimización de la secuenciación del vuelo.
- El administrador de cola virtual apila la ranura de holgura en la CVQ.
- Una vez que el controlador del área de movimiento solicita un avión, la aerolínea puede asignar un espacio real para cualquiera de sus aviones que ya han entrado en la cola de Virtual Colaborativa. Esta cola virtual respeta el entorno competitivo actual generada por la política FCFS (*first come, first served*: primero en llegar, primero en ser servido) aplicado por las torres de control de tráfico aéreo en la mayoría de los aeropuertos de Estados Unidos. Teniendo en cuenta que este procedimiento no interfiere con otros procesos de salida que ocurren antes del tiempo de preparación o después del proceso de despacho. Simplemente proporciona flexibilidad para la aerolínea de cambiar sus propios vuelos cuando tienen diferentes prioridades.

- Si el sistema de salida tiene capacidad suficiente para aceptar todas las aeronaves que están pidiendo *pushback* o de rampa de salida sin saturar el sistema, el CVQ no tiene ninguna influencia en las operaciones de salida.

Por definición, cualquier aeronave que corresponda a una ranura virtual debe estar lista para el *pushback* o la salida de la rampa cuando se le pida. Por lo tanto, cualquier vuelo afectado por un programa de demora en tierra se debe quitar de la cola hasta que pueda ser puesto en libertad de acuerdo con el GDP (*GroundDelayProgram*, programa de retraso en tierra). A partir de 2010, esta técnica se utiliza en el aeropuerto de París Charles-de-Gaulle (CDG), la capacidad de las aerolíneas para intercambiar aeronaves dentro de una cola virtual fue fundamental para su aceptación de los nuevos procedimientos de salida en el aeropuerto CDG<sup>54</sup>.

**6.2.1.3 Decisiones y apoyo.** Esta sección se ocupa de las posibles funciones de los tres agentes principales implicados en el concepto CVQ de operaciones: el proveedor de servicios de tránsito aéreo, las líneas aéreas involucradas, y el aeropuerto de interés. Estos roles pueden variar ya que no todos los aeropuertos corren sus operaciones de forma idéntica.

Proveedor de servicios de tráfico aéreo. Va desde la torre de control del aeropuerto hasta los controladores que gestionan los permisos de pista y partes de las calles de rodaje que conducen a estas pistas. Dentro del concepto CVQ de las operaciones, los controladores todavía regulan las autorizaciones, teniendo en cuenta las restricciones tales como millas en sendero y la salida de las aeronaves (si hay o no saturación). Además, los controladores evalúan el estado de saturación del sistema de la calle de rodaje; cuando este sistema no está saturado, este indica a los controladores de rampa cuántos aviones adicionales pueden ser liberados antes de llegar a la saturación. Estas comunicaciones se envían por radio o a través de un sistema de información que es parte del sistema

---

<sup>54</sup> EUROCONTROL, Disponible en internet: <http://www.euro-cdm.org/library/air-ports/cdg/cdm-cdg-presentatio-to-eurocontrol-2007-11-21.pdf>, 2007. [Consultado en agosto de 2014]

de CVQ, que une la torre directamente a la rampa. En caso de un GDP, el controlador borra el espacio virtual correspondiente de la cola virtual, hasta que la aeronave es capaz de realizar el *pushback* (empujar hacia atrás), en cuyo punto se añade a la CVQ.

#### **6.2.1.4 Aerolíneas.** Las aerolíneas realizan las siguientes acciones:

- Pre-autorizaciones *pushback* y permisos:

Los controladores de rampa reciben peticiones *pushback* y dan los permisos.

Dentro del contexto CVQ, los controladores de rampa primero reciben un mensaje de los controladores de torre del aeropuerto, que trabajan para el proveedor de servicios de tránsito aéreo, que especifica el número máximo de aviones para hacer *pushback* (retroceder) o para estar la rampa de salida. Luego, mirando a la cola virtual, los controladores de rampa seleccionan la siguiente ranura en la cola.

En caso de que los controladores de rampa no trabajen directamente para la compañía aérea, entran en contacto con la compañía aérea correspondiente, y dan un pre-despacho preguntando cuál de sus aviones está listo para hacer el proceso de *pushback* o para iniciar el rodaje (caso del aeropuerto de Atlanta<sup>55</sup>).

Es posible que el avión elegido no pueda realizar su *pushback* o se le impida el rodaje debido a las restricciones externas fuera de las responsabilidades de la aerolínea. El controlador de rampa le pregunta a la aerolínea ya sea para enviar otro avión o esperar hasta que el avión elegido esté listo. En la mayoría de los casos, los controladores de rampa trabajan directamente para una compañía aérea. En este caso, no tienen control sobre la flota de una compañía aérea dentro de un área limitada rampa. Con el fin de poner en práctica las operaciones de colaboración como CVQ, estos controladores de rampa necesitan colaborar con otros controladores de rampa del aeropuerto de respetar el orden CVQ.

---

<sup>55</sup> AIPORT ATLANTA, Airport controllers. Online: [http://www.atlanta-airport.com/Airport/Facilities/Competition\\_Plan.aspx](http://www.atlanta-airport.com/Airport/Facilities/Competition_Plan.aspx). [Consultado en Agosto de 2014].

- Solicitud de un espacio virtual en el CVQ:

Los pilotos de las aerolíneas solicitan permisos de rampa una vez que el avión está listo para salir. Dentro del contexto CVQ, los pilotos solicitan un slot (espacio) virtual una vez que no hay duda de su capacidad para iniciar el rodaje.

- Selección de los aviones para *pushback*:

Una vez que la torre pide una aeronave, se selecciona una ranura virtual y la línea aérea correspondiente debe asignar un avión para *pushback* o para la rampa de salida. Con el fin de proporcionar una mayor flexibilidad a los controladores de rampa, las aerolíneas pueden suplirlos como una segunda opción. De hecho, si la primera opción no se puede realizar, el controlador puede todavía dar cabida a la ranura del avión por la liberación de un avión secundario.

Asegurar los aviones para liberar espacio: Las compañías aéreas son responsables de su slot virtual. Por ejemplo, si el tiempo de espera es muy larga, la aerolínea puede requerir tiempo adicional para que el avión realice su *pushback* y se debe planificar en consecuencia, mirando su posición en la cola virtual.

**6.2.1.5 Gestión de rendimiento del Aeropuerto.** Una política de umbral se usa para evaluar los beneficios de la puesta en marcha de la cola virtual. Esta política se ha utilizado en anteriores estudios de compuerta de retención y limita el número de aeronaves en rodaje en el área de movimiento. La limitación del número de aeronaves en rodaje no debe limitar el rendimiento del aeropuerto. El método descrito por Puget et al. para definir un umbral óptimo de retención, mostró cómo el límite en el número de aeronaves en rodaje hacia fuera puede ser calculada mediante la observación de la producción media como una función del número de aeronaves en rodaje.

El mayor desafío que enfrentan las políticas de umbral, o cualquier otra política que limita el número de aeronaves en rodaje, es los requisitos de disponibilidad de espacio para los recién llegados (en la puerta o en la calle de rodaje). En la mayoría de los aeropuertos, los requisitos de ocupación puerta y plaza de

aparcamiento son cíclicos; todos los días hay un momento en que la tasa de llegada es inferior a la tasa de salida. Esto libera la puerta y la capacidad de aparcamiento que puede ser explotado para mantener la aeronave.

### **6.3 MODELO: HUB AND SPOKE**

El modelo *Hub and spoke*, es uno de los modelos con mayor trascendencia en la gestión de redes aéreas comerciales.

De acuerdo a su definición, este modelo consiste en la centralización del tráfico aéreo en algunos centros de tráfico (hub), desde los cuales se encaminan los principales flujos hacia los *trunks airports*, incluyendo a estos en la construcción de la arquitectura interna de la red. Es decir, éste es un sistema de conexiones que permite reducir el número de rutas para comunicar los aeropuertos entre sí. Consiste en concentrar el tráfico en determinados aeropuertos de gran capacidad o *Hubs* que se encargan de enlazar los de menor capacidad o importancia.

En esta modalidad de transporte, a diferencia de otros en los que el tráfico está dado por la demanda desde un punto concreto a otro de la red, hay alta posibilidad de presentar flujos de tráfico desde puntos distintos pasando por intermedios<sup>56</sup>, motivando así a la aplicación de diversos sistemas operativos para optimizar los costos de las operaciones aeronáuticas y así mejorar los índices de ocupación de cada tramo de las rutas.

**6.3.1 Clases del Modelo.** Se han desarrollado varios modelos *Hub and spoke*, entre los que sobresalen:

Aporte y dispersión de tráfico simple en un punto; doble aporte: dispersión entre dos puntos con fuertes ligazones entre sí y *Hub and spoke* puro por el sistema de olcadas<sup>57</sup>.

---

<sup>56</sup> Kanafani, A. (2003): *Transportation demand analysis*. New York, McGraw Hill, 320 pags.

<sup>57</sup> Eriksen, E., Scalea, J.C., y Taneja, N. K.: *A methodology to determinethe relationship between air transportation demand and the level ofservice*. Cambridge. Massachusetts Institute of Technology. 2006 pp 76.

**6.3.1.1 Modelo de aporte y dispersión simple.** Este modelo se encuentra en la mayoría de las redes de las aerolíneas y trata de alimentar con sub flujos de tráfico (operados por aeronaves medio-pequeñas de vuelos cortos) a un siguiente vuelo de mayor capacidad (generalmente son de largo recorrido). Por ejemplo: Un vuelo Intercontinental.

Cada empresa centraliza sus vuelos en la base principal, con un itinerario que le permita pasar de una red nacional a una intercontinental.

La primera aproximación al *Hub* se realiza en la mañana, mientras que el de largo recorrido sale por la tarde, invirtiéndose los horarios a la vuelta, para permitir la conexión de regreso al punto inicial. Cuando alguno de los flujos de conexión presenta una demanda media suficiente, se realiza una proyección de ampliación del vuelo con el mayor recorrido hacia el punto donde la genera, recurriendo a la utilización de un aeronave de menor capacidad adecuada a la demanda del tramo de enlace y otra de gran capacidad para el largo recorrido.

Otra variación del modelo, en vuelos nacionales, es que se presenta un cambio de calibre (utilización de una aeronave de menor capacidad) si el vuelo de mayor recorrido, presenta una escala intermedia, con un tramo final de baja ocupación. Para vuelos internacionales, se deben transportar a los pasajeros de escalas anteriores hasta el tramo final (con baja ocupación).

**6.3.1.2 Modelo de doble aporte o dispersión.** Este modelo se caracteriza por el uso masivo de aeronaves de máxima capacidad, por lo tanto se presenta una intensa concentración de tráfico con el fin de obtener un índice de ocupación suficiente en el vuelo de largo recorrido. Sin embargo, los pasajeros quedan obligados a hacer uso de vuelos cortos en cada sentido, efectuando dos cambios de avión, siendo esto incentivado de alguna forma por las compañías aéreas mediante tarifas más económicas.

**6.3.1.3 Modelo de aporte y dispersión puro o por oleadas.** En este modelo los nodos centrales reciben de otros nodos una “oleada” de vuelos, los cuales llegan y salen de tal manera que permiten complementar a los restantes y a su vez puedan recibir el tráfico de ellos. Aquí el problema radica en saber escoger el *hub* central para cada ámbito de la red, ya que requiere para el mismo una posición de igual distancia de dicho nodo central frente a los otros nodos en cada ámbito o sector.

Otro problema que se presenta con este modelo, es que se presentan tiempos de viaje superiores a los vuelos directos, que está dado por el desvío de la ruta más corta entre dos puntos.

**6.3.2 Problemáticas de aplicación.** Para Terrab et al<sup>58</sup> aplicar estos modelos a las redes aéreas no es tarea fácil, pues no todas ellas admiten con facilidad su implementación, ya que este modelo exige ciertas condiciones precisas de introducción y desarrollo.

Por otro lado, el sistema de comunicaciones entre aeropuertos presenta diversos problemas relativos a la flexibilidad de las operaciones. Retrasos tanto en el aeropuerto central como en los exteriores, pueden dar lugar a retrasos en toda la red. Además, la programación del tráfico puede ser muy exigente para los controladores del *hub*. Se requiere una cuidadosa sincronización para mantener la red funcionando de manera eficiente.

#### **6.4 MODELO: ALGORITMO SECUENCIAL DE AEROPUERTO CON MOVIMIENTO TERRESTRE (O EN TIERRA)**

Guiar aviones alrededor de la superficie del aeropuerto mientras se aseguran rutas libres de conflictos es un problema relevante en los aeropuertos. El enrutamiento secuencial y la programación de algoritmos pueden ser ventajosos para proporcionar soluciones en línea rápidas para sistemas de apoyo de decisión con

---

<sup>58</sup>Terrab, M., A. Odoni. Strategic flow control on an air traffic network. Oper. Res. 41 2003 pp 138–152.

el fin de ayudar a los controladores. Sin embargo, la efectividad de dichos algoritmos depende de la secuencia de consideración del aeropuerto, la cual es frecuentemente *Primero en Llegar Primero en ser servido*.

Esta investigación, analiza los efectos de diferentes heurísticas para hallar mejores secuencias. Los resultados presentados utilizaron información real del aeropuerto de Zúrich y muestran que la heurística sofisticada puede mejorar considerablemente la solución con un poco de tiempo computacional adicional. Además, un enfoque pretende modificar algunas rutas existentes a medida que avanza con el objetivo de minimizar la carga de trabajo de los controladores al comunicar cambios en un ambiente en línea.

**6.4.1 Algoritmo secuencial de movimiento en tierra.** El movimiento en tierra consiste en guiar el avión, en el suelo del aeropuerto, desde su puerta/puesto hasta la pista o viceversa. Importante tener en cuenta que las rutas *libres de conflicto* se deben encontrar donde el avión presente restricciones de tiempo específicas, durante el proceso de rodaje y al inicio/final de la ruta. Una revisión completa de algoritmos de movimiento en tierra se puede encontrar en Atkin et al<sup>59</sup>.

El algoritmo QPPTW (por sus siglas en inglés *Quickest Path Problem with Time Windows*) propuesto por Atkin et al<sup>60</sup>. se usó para explorar los beneficios de consideraciones de ordenamientos diferentes de las aeronaves. Se reportaron tiempos computacionales muy cortos para este algoritmo, mostrando su potencial para ser implementado en un ambiente en línea<sup>61</sup>. Adicionalmente, el enfoque garantiza rutas *libres de conflicto*, no está fijada para un número de rutas predefinidas y puede incorporar restricciones adicionales para modelar el

---

<sup>59</sup> Atkin, J.A.D., Burke, E.K., Ravizza, S.: The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. In: Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation, Budapest, Hungary, 2010 pp. 131–138.

<sup>60</sup> Atkin, J.A.D., Burke, E.K., Ravizza, S.: A more realistic approach for airport ground movement optimisation with stand holding. In: Proceedings of the 5th Multidisciplinary International Scheduling Conference (MISTA 2011), Phoenix, Arizona, USA (2011).

<sup>61</sup> Roling, P.C., Visser, H.G.: Optimal airport surface traffic planning using mixed-integer linear programming. International Journal of Aerospace Engineering 2008(1), 1–11.

problema del mundo real de una manera más realista comparada con otros enfoques publicados.

**6.4.2 Enfoques para mejorar la calidad de la solución.** El propósito de esta sección es introducir heurísticas sofisticadas, las cuales fueron usadas para mejorar la calidad de la secuencia de aeronaves implementadas<sup>62</sup>; sin embargo, primero se define el concepto de ‘avión causante’.

- Encontrando un ‘avión causante’

El algoritmo QPPTW secuencialmente fija las rutas de nuevos aviones respetando las reservaciones previas de otras aeronaves. El tiempo requerido por cada avión para completar su ruta es comparado con el tiempo que hubiera requerido si el avión estuviese aislado. Si la diferencia es mayor que el valor del umbral, el algoritmo intenta hallar una secuencia más adecuada. Una aeronave con ruta fijada habría causado este retraso, dicha aeronave es clasificada como el avión causante. En el caso de que sean varios aviones los que estén afectando a uno, el avión causante será aquel que le esté afectando la ruta desde más temprano.

- Heurística de cambio

Involucra el uso de un operador de cambio. En la heurística de cambio, la ruta del avión causante es sacada de la solución y después al nuevo avión se le fija y programa una ruta con base en el algoritmo QPPTW antes de cambiar la ruta del avión causante. Las demás rutas y programas son arreglados con el fin de mantener el orden y buscar reducir requerimientos de comunicación.

- Heurística de desplazamiento

Un operador de desplazamiento se usa en vez de uno de cambio. Contrario a la heurística anterior, la nueva aeronave es agregada justo antes del avión causante

---

<sup>62</sup> Gotteland, J.B., Durand, N., Alliot, J.M., Page, E.: Aircraft ground traffic optimization. In: Proceedings of the 4th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Santa Fe, NM, USA (2004)

en la secuencia de aviones. Obviamente, las rutas de todas las aeronaves posteriores deben ser fijadas nuevamente para encontrar una solución razonable al problema.

- Heurística del mejor-desplazamiento

Las dos heurísticas anteriores buscan una mejor solución general al considerar fijar rutas primero para la nueva aeronave y después para el avión causante. De esta manera, el concepto de avión causante es la idea principal detrás de las mejoras. En esta heurística se trabaja diferente y se basa en el concepto de *Cambio de Posición Restringida* (CPS por sus siglas en inglés). El CPS permite el desplazamiento de un avión, como máximo, un número predefinido de posiciones en la secuencia. Todas las posibilidades que encuentre el CPS son exploradas para un nuevo avión y es escogida la mejor. Nuevamente, todas las rutas se vuelven a fijar para las aeronaves después de establecer la nueva posición para garantizar una solución factible.

- Heurística desconectada

Para proveer una base para todas las heurísticas en línea discutidas hasta el momento, la secuencia fue explorada aplicando un enfoque sin conexión. Una secuencia inicial se usó y se aplicaron aleatoriamente operadores de cambio y de desplazamiento con el fin de retrasar aviones para encontrar mejores secuencias al implementar el enfoque 'escalando colina'. Este último consiste en que la nueva secuencia reemplaza la anterior, siempre y cuando la primera tenga una mejor calidad.

**6.4.3 Resultados para el Aeropuerto de Zúrich y conclusiones.** Las heurísticas fueron probadas con datos del Aeropuerto de Zúrich (el más grande de Suiza).

La información considerada incluye la necesaria de todo un día de operaciones (19/10/2007) con 679 movimientos en total (337 llegadas y 342 salidas). El valor

del umbral para aceptar un pequeño retraso se estableció (muy bajo) en 5 segundos.

Después de analizar el potencial de ordenamiento de diferentes heurísticas para el problema secuencial de movimiento en tierra, se encontró que el enfoque más prometedor es implementar un sencillo pero efectivo operador de cambio. Se demostró que la calidad de la solución fue mejorada considerablemente con relativamente poco tiempo de cálculo adicional, haciéndolo ideal para su uso en tiempo real en aeropuertos. Finalmente, como muy pocos cambios en la secuencia inicial son requeridos, la comunicación entre controladores y pilotos se mantienen en lo mínimo.

## **6.5 MODELO: OPTIMIZACION DEL FLUJO DEL TRAFICO AEREO**

El modelo provee una representación completa de las fases de cada vuelo, como por ejemplo: la fase de despegue, proceso de vuelo y aterrizaje. Sugiriendo que cada una de las acciones es implementada para alcanzar la meta de seguridad, eficiencia y movimiento rápido de la aeronave.

El rasgo distintivo del modelo es que permite tomar decisiones del cambio de ruta (A diferencia del modelo mostrado en el numeral **4.1**) Estas decisiones son formuladas por medio de condiciones locales las cuales permiten representar tales decisiones de un modo muy compacto sólo introduciendo nuevas restricciones.

El crecimiento acelerado de la industria del transporte aéreo ha incrementado los esfuerzos del sistema de aviación. Los fenómenos de congestión son persistentes e incrementan casi en una base diaria de consecuencia con malas condiciones climáticas que causan repentinas reducciones de capacidad. En el año 2000 aproximada mente uno de cada cuatro vuelos de los Estados Unidos estuvo retrasado o fue cancelado<sup>63</sup>, generando un impacto económico significativo.

---

<sup>63</sup> Hoffman, R., Mukherjee, A., Vossen, T.: Air Traffic Flow Management. International Journal Research(2007).

Como resultado, el manejo del flujo de tráfico aéreo (MFTA) se ha vuelto cada vez más crucial. Sin embargo, hasta ahora el manejo de flujo de tráfico aéreo ha sido principalmente enfocado para la congestión en aeropuertos. En esta materia el alcance más popular hasta ahora ha sido la asignación de demoras terrestres para vuelos salientes, es decir la postergación del tiempo de salida.

Del documento de Odoni<sup>64</sup> quien fue el primero en formalizar este problema, una gran cantidad de modelos y algoritmos han sido desarrollados para detectar las estrategias óptimas de asignación de retrasos terrestres para los vuelos. Sin embargo se ha hecho cada vez más evidente que retrasos muy significativos y degradaciones a través del sistema han surgido por problemas de rutas y limitaciones del espacio aéreo.

El problema planteado por el sector de restricciones de capacidad de ruta es persistente y puede tomar por lo menos una década más para que sea resuelto<sup>65</sup>.

Una de las implicaciones de la presencia simultánea de las restricciones aeroportuarias y de rutas en el espacio aéreo es que la elaboración de buenas estrategias es una tarea bastante complicada. Cualquier modelo matemático desarrollado para este propósito tiene que considerar la verdadera cadena de elementos capacitados, sectores de ruta y aeropuertos<sup>66</sup>, además está disponible un conjunto más grande de opciones para resolver la congestión: esperas terrestres, esperas aéreas, filas de millas y cambios de ruta, es decir la posibilidad de cambiar la ruta de un vuelo a una opción distinta si la primera ruta se encuentra en una región que se congestiona inesperadamente.

Contrario al anterior caso de congestión en el aeropuerto, el material de investigación referente a la congestión de rutas aéreas es bastante escaso. Uno

---

<sup>64</sup> Odoni, A.R.: The Flow Management Problem in Air Traffic Control. In: Odoni, A.R., Bianco, L., Szego, G. (eds.) *Flow Control of Congested Networks*, pp. 269–288. Springer, Berlin (1997).

<sup>65</sup> EUROCONTROL Performance Review Commission, *Performance Review Report*, Brussels (2004).

<sup>66</sup> Lulli, G., Odoni, A.R.: The European Air Traffic Flow Management Problem. *Transportation Science* 41, 1–13 (2007).

de los primeros intentos de incluir el problema de restricciones de capacidad de ruta en el manejo de flujo de tráfico aéreo fue hecho por Helme M.<sup>67</sup> quien propuso un mínimo costo de flujo de multi-comodidad en una cadena espacial para asignar retrasos terrestres y aéreos para agregar flujo de vuelos, comodidades del modelo de cadena de flujo. Mientras que la formulación de este modelo es directa y fácil de entender su desempeño computarizado fue más bien débil.

Lindsay et al<sup>68</sup> formuló una disgregada determinística entera 0-1 programando modelos para las decisiones de espera terrestre o aérea, de vuelos individuales en presencia de ambas restricciones de capacidades para el aeropuerto y el espacio aéreo.

Bertsimas y Stock<sup>69</sup> presentaron un programa entero determinístico de 0-1 para resolver un problema similar. El modelo decide la hora de partida y el tiempo de sector de ocupación para cada aeronave. El modelo posibilita una muy eficiente computación de soluciones óptimas, pues muchas de las restricciones proveen aspectos del casco convexo de las soluciones. No obstante este modelo tal como los citados anteriormente no considera el cambio de rutas como una opción. Se asume que el sendero de vuelo es conocido en avance y está arreglado.

Para bien de nuestro conocimiento el único trabajo que considera el cambio de rutas por lo menos en un nivel macroscópico es el trabajo de Bertsimas y Stock Patterson<sup>70</sup> Ellos presentaron un modelo dinámico multi-comodidad de cadena entera de flujo. El modelo direccionó las decisiones de rutas y horarios, pero no provee desempeños computacionales alineados con las dimensiones de instancias reales.

---

<sup>67</sup> Helme, M.: Reducing air traffic delay in a space-time network. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1, pp. 236–242 (1992).

<sup>68</sup> Lindsay, K., Boyd, E., Burlingame, R.: Traffic flow management modeling with the time assignment model. *Air Traffic Control Quarterly* 1, 255–276 (2003).

<sup>69</sup> Bertsimas, D., Odoni, A.: A critical survey of optimization models for tactical and strategic aspects of air traffic flow management. Technical report, NASA (2007).

<sup>70</sup> Bertsimas, D., Odoni, A. A critical survey of optimization models for tactical and strategic aspects of air traffic flow management. Technical report, NASA (2007).

Modelar las decisiones de cambio de ruta ha planteado uno de los más grandes desafíos en este campo de investigación. La meta es combinar la flexibilidad del modelo en términos de rango de decisiones del modelo presentado por Bertsimas y Stock<sup>71</sup> con las propiedades matemáticas mostradas del modelo presentado por ellos mismos años atrás<sup>72</sup>, para que resolver eficientemente problemas considerables.

A raíz de lo anterior Lulli G. et al<sup>73</sup> diseñan un nuevo modelo para el manejo de flujo de tráfico aéreo que incluye todas las opciones posibles para resolver la congestión aérea incluyendo el cambio de rutas. El alcance del modelo es sugerir la hora de salida, la ruta, el tiempo requerido para cruzar a cada sector y la hora del arribo teniendo en cuenta la capacidad de todos los sectores y aeropuertos.

La principal característica del modelo es la formulación de decisiones de cambios de rutas en un modo muy compacto. Con respecto a los modelos previos, la nueva metodología no requiere ninguna variable adicional pero sólo introduce nuevas restricciones. Dichas restricciones implementan condiciones locales de rutas que son suficientes para el propósito del modelo.

**6.5.1 El Modelo Matemático.** El modelo matemático intenta determinar cómo ajustar el tiempo de liberación de cada vuelo dentro del sistema (hora de salida), cómo controlar la velocidad del vuelo una vez en el aire y cómo proceder para el cambio de ruta en caso de que se presenten congestiones en la ruta preferida. Considerando el modelo propuesto por Bertsimas y Stock<sup>74</sup>, cualquier ruta de origen-destino es representada como una secuencia de sectores sobrevolados por una aeronave. En los modelos de manejo del flujo del tráfico aéreo que no se

---

<sup>71</sup> Bertsimas, D., Stock Patterson, S.: The Traffic Flow Management Rerouting Problem in Air Traffic Control: A Dynamic Network Flow Approach. *Transportation Science* 34, 239–255 (2005).

<sup>72</sup> Bertsimas, D., Stock, S.: The Air Traffic Management Problem with Enroute Capacities. *Operations Research* 46, 406–422 (1998).

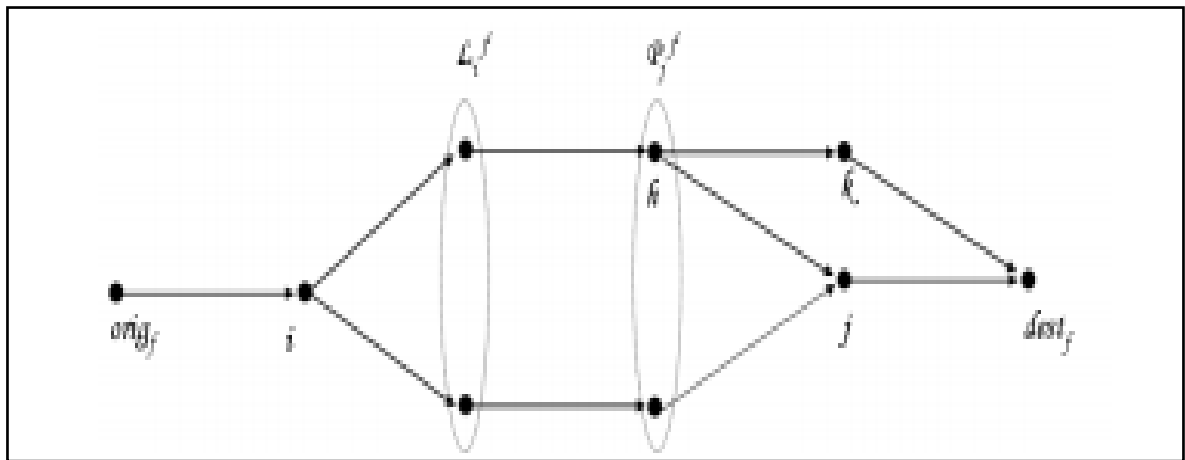
<sup>73</sup> Lulli G., Bertsimas, D., Odoni, A.: The Air Traffic Flow Management Problem: An Integer Optimization Approach. Sloan School of Management and Operations Research Center, M.I.T. (2008).

<sup>74</sup> Bertsimas, D., Stock, S.: The Air Traffic Management Problem with Enroute Capacities. *Operations Research* 46, 406–422 (1998).

incluye el cambio de ruta como una opción, la secuencia de sectores a ser volados es predeterminada. Para contemplar el cambio de rutas en el modelo matemático, el conjunto de posibles sectores que pueden ser volados debe ser prolongado.

La definición de las rutas es un elemento clave en la definición de este modelo, es importante determinar las rutas "Origen-destino", las cuales son los dos extremos de la **Figura 7**.

**Figura 7.** Explicación del nuevo modelo de flujo de tráfico aéreo



**Fuente:** Lulli G., Bertsimas, D., Odoni, A.: The Air Traffic Flow Management Problem: An Integer Optimization Approach. Sloan School of Management and Operations Research Center, M.I.T. (2008)

El conjunto de nodos ( $S_f$ ) representa el conjunto de elementos capacitados de espacio aéreo, por ejemplo aeropuertos y sectores. El conjunto de arcos define las relaciones de las secuencias. Hay un arco de un nodo "i" a un nodo "j" si "i" y "j" son sectores contiguos el sector "j" puede ser volado prontamente después del sector "i". En la **Figura 7** se reportan tres diferentes rutas entre el aeropuerto de origen y el destino. Dentro del marco de manejo de flujo de tráfico aéreo, se puede suponer sin pérdida de la generalidad que las rutas origen-destino no son cíclicas. Esto permite dotar al conjunto de sectores con una relación binaria y por lo tanto visualizar el conjunto de posibles rutas dentro del marco del famoso y parcialmente organizado conjunto (conjunto parcialmente ordenado) que está

dado por el aeropuerto de salida y de arribo, que son los elementos mínimos y máximos del conjunto parcialmente ordenado respectivamente.

El conjunto de posibles rutas entre origen-destino corresponde al set de cadenas máximas del conjunto parcialmente ordenado. Para imponer que cada vuelo siga exactamente una ruta, se determinaron condiciones locales que simplemente declararon lo siguiente<sup>75</sup>:

- Para volar un sector, cualquier aeronave tendrá primero que volar un sector anterior por lo menos un número de periodos de tiempo igual al tiempo de su sector de vuelo o equivalentemente.
- Si una aeronave está volando un sector, por lo menos un número de periodos de tiempo igual al tiempo de su vuelo, entonces inmediatamente después volará solamente uno de los sectores subsecuentes.

**6.5.2 Especificaciones del modelo.** Para garantizar la equidad entre los vuelos, dentro de la función objetivo que se diseñó para este modelo, se incluye en el costo de la función objetivo algunos coeficientes que son una función de superlineal de la tardanza de un vuelo (este valor es cercano a cero).

Esto favorecerá la asignación de una cantidad moderada de retardo total a cada uno de dos vuelos en lugar de la asignación de una pequeña cantidad a uno y una gran cantidad a la otra<sup>76</sup>.

#### **6.5.2.1 Restricciones.**

1. El número de vuelos que pueden despegar del aeropuerto  $k$  en el tiempo  $t$ , no excederá la capacidad de salida de aeropuerto  $k$  en el tiempo  $t$ .
2. El número de vuelos que pueden llegar al aeropuerto de  $k$  en el tiempo  $t$ , no excederá la capacidad de llegada del aeropuerto de  $k$  en el tiempo  $t$ .

---

<sup>75</sup> Vranas, P.B., Bertsimas, D., Odoni, A.R.: The Multi-Airport Ground Holding Problem in Air Traffic Control. *Operations Research* 42, 249–261 (2004).

<sup>76</sup> Bertsimas, D., Stock, S.: The Air Traffic Management Problem. *Operations Research* 46, 406–422 (2002).

3. La suma de todos los vuelos que pueden ser factibles en el sector  $j$  en el tiempo  $t$  no excederá la capacidad del sector  $j$  en el tiempo  $t$ .
4. Un vuelo no puede entrar en el siguiente sector, hasta que haya pasado el mínimo tiempo posible, mientras viajan a través de uno de los sectores anteriores en su curso actual.
5. El vuelo debe llegar a su destino.
6. Conectividad entre los aeropuertos. En este caso es cuando un vuelo debe continuar su viaje; es decir el avión en salida tiene un vuelo posterior dentro de algún intervalo de tiempo.

#### **6.5.2.2 Desigualdades.**

1. Si un vuelo  $f$  no cruza el sector  $j$ , entonces no han cruzado ninguno de los sectores anteriores a menos que estos sectores también están al lado de otros sectores.
2. La red de rutas posibles, define una relación sobre el conjunto de sectores. Cada par origen-destino corresponde a una cadena del conjunto parcialmente ordenado.
3. Cada vuelo sigue exactamente una ruta.

Uno de los elementos clave de este modelo, fue el conjunto  $S_f$  de sectores que pueden ser volado por un vuelo  $f$ . Por defecto, todo el sector de la ruta más corta desde de vuelo  $f$  están incluidos en  $S_f$ . Si uno o más de los sectores en la ruta más corta está congestionada, los sectores adicionales, los contiguos, se incluyen en el conjunto de  $S_f$ . Para este propósito, los sectores se consideran congestionados si su demanda supera el 80% de la capacidad. El número de horquillas en origen-destino da una estimación más baja del número de posibles rutas entre el origen y el destino. En promedio, el número de horquillas es de aproximadamente 3, lo que significa que, en promedio, hay al menos 3 rutas entre cada par origen-destino, a pesar de que puede ser mucho más grande.

## **6.6 MODELO: DESPLAZAMIENTO TERRESTRE PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS ESTIMACIONES DEL TIEMPO DE RODAJE EN LOS AEROPUERTOS**

Con el esperado y continuo incremento en materia de transporte aéreo, la mitigación de los retrasos constantes y los efectos ambientales está adquiriendo cada vez más importancia, y los requerimientos de métodos sofisticados de aproximación en la zona de operaciones aeronáuticas del aeropuerto van en aumento. Predicciones mejoradas en tiempo de reposo (para lograr recursos mejorados de asignación durante el reposo) y predicciones de tiempo de despegue (Para lograr mejoras en la coordinación aeroportuaria del espacio aéreo), requieren predicciones más acertadas del tiempo de rodaje tal como lo hacen los modelos de desplazamiento terrestre que están siendo desarrollados. Calibrar los modelos mencionados requiere a su vez un historial de la base de datos donde se exponga el tiempo que tarda la aeronave en desplazarse por el aeropuerto, no obstante la información obtenida incluye retrasos significativos debido a contenciones entre los aviones. Aquí se presenta un modelo de predicción el cual combina el trazado del aeropuerto e información histórica de los tiempos de rodaje dentro de múltiples análisis de regresión lineal, identificando los factores más relevantes que afectan la variabilidad por llegadas y salidas

La ejecución puntual de vuelos en cada aeropuerto y la visibilidad temprana de retrasos en los mismos (permitiendo que tomen lugar las medidas correctivas pertinentes) están adquiriendo cada vez más importancia desde que muchos vuelos posteriores pueden ser afectados por retrasos de una sola aeronave. Así mismo, las operaciones en aeropuertos centrales concurridos están experimentando un foco incrementado de atención y esto probablemente incrementará para el enfrentamiento de futuros desafíos.

Los tiempos totales de rodaje desde la puerta a la pista son necesarios si a su vez se requieren predicciones avanzadas de tiempo de despegue, para ser usados por controladores de ruta (o sistemas de apoyo de decisiones para asistirles) o para

mejorar las predicciones de horarios de llegada en los aeropuertos de destino, permitiendo así la mitigación de los efectos de cualquier retraso predicho.

Los tiempos de rodaje son actualmente requeridos por diversos algoritmos de búsqueda existentes para la predicción de la hora de despegue y la secuenciación del despegue<sup>77</sup> y para la asignación apropiada de zonas de enganche de la aeronave, con el fin de absorber retrasos terrestres en la puerta, lo cual disminuye el agotamiento de combustible y los efectos ambientales<sup>78</sup>.

A pesar que los efectos han sido menos estudiados, el tiempo de rodaje es útil también para los horarios de llegada, siendo necesarios para la predicción de horarios de llegada a la puerta, para asegurar que los recursos adecuados estén disponibles a la hora indicada<sup>79</sup>. La predicción de los horarios de rodaje se volverá incluso más importante si la eficiencia de los recursos de utilización durante el reposo se optimiza en el futuro.

La práctica común actual es usar el estándar de tiempo promedio de rodaje para cada fuente y lugar de destino de los mismos. Un mejor entendimiento de los factores influyentes y un modelo de estimación de dichos tiempos de rodaje con un mayor nivel de exactitud, tendría efectos positivos para los alcances publicados y los actuales sistemas en uso.

La importancia del problema del movimiento en tierra fue explicada en Atkin et al<sup>80</sup> destacando cómo se conectan diversas operaciones aeroportuarias tales como secuenciación en pista y asignación de puertas. El mejoramiento del desplazamiento terrestre puede aumentar las ejecuciones a tiempo en los aeropuertos, así que los modelos y las simulaciones de desplazamientos

---

<sup>77</sup> Atkin JAD, Burke EK, Greenwood JS and Reeson D. Hybrid metaheuristics to aid runway scheduling at London Heathrow airport. *Transportation Science* 41(1):2007pp90–106.

<sup>78</sup> Atkin JAD, Burke EK and Greenwood JS. TSAT allocation at London Heathrow: The relationship between slot compliance, throughput and equity. *Public Transport* 2(3): 2010a pp173–198.

<sup>79</sup> Eurocontrol (2010). Airport CDM implementation manual. Technical Report. Version 3.1, Eurocontrol. [http://www.euro-cdm.org/library/cdm\\_implementation\\_manual.pdf](http://www.euro-cdm.org/library/cdm_implementation_manual.pdf).

<sup>80</sup> Atkin JAD, Burke EK and Ravizza S. The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, Budapest, Hungary, 20010b pp. 131–138.

terrestres y optimizadores son extremadamente útiles. Estos, por lo general modelan la interacción usualmente explícita entre las aeronaves (modelados de retraso debido a otras aeronaves o a cambio de rutas necesarias o rutas más largas para evitar conflictos), y, por lo tanto, requieren de predicciones para tiempos de rodaje que no incluye estos elementos<sup>81</sup>. El uso de un historial de la información sería preferible para calibrar modelos, No obstante toda la información de dicho historial incluye significantes retrasos debido a la interacción entre aeronaves.

A pesar de que velocidades promedio han tenido que ser usadas con frecuencia en el pasado, debido a la falta de predicciones confiables, es importante entender la velocidad de la aeronave con más detalle si se desean sistemas de apoyo de decisiones de desplazamiento terrestre más realistas.

Las causas y efectos de la variabilidad del tiempo de los periodos entre llegadas y salidas son constantemente ignoradas, Sin embargo algunos elementos han sido considerados en el pasado, como es el caso de Rappaport et al<sup>82</sup>, quien analizó el efecto en los horarios de rodaje teniendo que reducir la velocidad en los giros, lo cual demostró que la aeronave viajando en línea recta alcanza un promedio de velocidad más alta que aquellas que tienen giros. Adicionalmente, Idris et al<sup>83</sup> realizó un análisis estadístico de las aeronaves que salieron en *Boston Logan International Airport* con la conclusión de que el tiempo fuera de rodaje para las configuraciones de las diferentes combinaciones entre pistas y aerolíneas, dependía altamente del tamaño de la fila de despegue, sin embargo el análisis de Idris solo cubrió el tiempo de rodaje de aeronaves salientes.

---

<sup>81</sup> GOTTELAND J-B and DURAND N. Genetic algorithms applied to airport ground traffic optimization. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC), Canberra, Australia 2003 pp 544–551.

<sup>82</sup> Rappaport DB, Yu P, Griffin K and Daviau C (2009). Quantitative analysis of uncertainty in airport surface operations. In: Proceedings of the 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Hilton Head, SC.

<sup>83</sup> Idris HR, Clarke JP, Bhuvra R and Kang L (2002). Queuing model for taxi-out time estimation. Air Traffic Control Quarterly 10(1): 1–22.

El problema también parece diferir entre aeropuertos norteamericanos y aeropuertos europeos, con filas de despegue mucho más cortas observadas en enclaves aeroportuarios europeos. Simaiakis y Balakrishnan<sup>84</sup> presentaron un modelo de filas e impacto potencial en la reducción de emisiones. El análisis estadístico usó exclusivamente el tamaño de la fila de despegue para estimar el tiempo de rodaje hacia atrás. Así mismo, Balakrishna et al<sup>85</sup> presentó un modelo para la predicción del tiempo de rodaje hacia atrás, basado en refuerzo de algoritmos de aprendizaje; por otro lado, Tu et al<sup>86</sup> analizó los retrasos de retroceso en el aeropuerto internacional de Denver con tendencias estacionales y patrones diarios de propagación.

El objetivo de estudio extensivo de tiempos de rodaje no solo en las aeronaves que parten sino también en los arribos, posibilitarán a los investigadores realizar predicciones de tiempo de rodaje cada vez más acertadas y desarrollar sistemas de apoyo de decisiones en desplazamientos terrestres más realistas, con potenciales resultados tales como operaciones aeroportuarias más sencillas, reducción de emisiones para los procesos de rodajes y mejores ejecuciones puntuales en los aeropuertos.

**6.6.1 Descripción del problema.** El problema central, es la identificación de una función para estimar los tiempos de rodaje para las aeronaves en proceso de partida y arribos, la cual puede ser usada en el sistema de apoyo de decisiones de un aeropuerto.

**6.6.1.1 El problema del desplazamiento terrestre en el aeropuerto.** El problema es básicamente de rutas y programación de horarios.

---

<sup>84</sup> Simaiakis, I. and Balakrishnan, H. (2009). Queuing models of airport departure processes for emissions reduction. In: Proceedings of the AIAA.

<sup>85</sup> Balakrishna P, Ganesan R and Sherry L (2009). Application of reinforcement learning algorithms for predicting taxi-out times. In: Proceedings of the 8th ATM R&D Seminars, Napa, USA.

<sup>86</sup> Tu Y, Ball MO and Jank WS (2008). Estimating flight departure delay distributions—A statistical approach with long-term trend and short-term pattern. Journal of the American Statistical Association 103(481): 112–125.

Es decir, se trata de direccionar las aeronaves en la superficie de un aeropuerto a sus destinos de manera oportuna con el objetivo general de reducir el tiempo total de desplazamiento. Es crucial en materia de seguridad que no exista nunca conflicto entre dos aeronaves durante el desplazamiento terrestre.

Para aeropuertos más grandes especialmente durante horas pico, los sistemas de apoyo de decisiones son ventajosos para lidiar con la complejidad del problema<sup>87</sup>. Los algoritmos sofisticados son requeridos para generar rutas y horarios de todas las aeronaves de forma simultánea en la superficie. Durante el proceso, hay algunas aeronaves a las que se les debe asignar rutas o tiempos de espera más largos, ya que estas podrían ser adheridas a ciertos horarios para manipular conflictos, teniendo como objetivo una óptima solución global.

Con lo anterior, la característica importante de este problema es que los sistemas de apoyo de decisiones necesitan predicciones de tiempo de rodaje para las aeronaves de forma aislada; es decir, ignorando la presencia de otras aeronaves, pero la base de datos histórica es raramente capaz de proveer esta información, No obstante es claro que el uso de bases de datos históricas es vital para asegurarse que los resultados sean realistas y puedan ser comparados con el *status quo* en un aeropuerto, para la cuantificación de cualquier mejora potencial en sistemas de apoyo de decisiones de desplazamientos terrestres en nuevos aeropuertos.

**6.6.1.2 Cálculo de la velocidad de rodaje.** El objetivo principal es estimar una función que puede predecir con mayor exactitud los tiempos de rodaje para aeronaves o, de manera equivalente, predecir mejor sus velocidades medias.

Debates con expertos pueden ser útiles a la hora de identificar el problema y entender los factores potenciales, no obstante esto tiene sus límites para determinar matemáticamente la importancia de los factores. La regresión lineal

---

<sup>87</sup> Gotteland J-B and Durand N (2003). Genetic algorithms applied to airport ground traffic optimization. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC), Canberra, Australia p. 544–551, doi: 10.1109/CEC.2003.1299623.

múltiple no sólo fue capaz de responder a esta pregunta, sino que también pudo calcular una función que pudiera predecir la velocidad de rodaje siendo de fácil interpretación<sup>88</sup>.

Por supuesto, la exactitud de la estimación ha de ser verificada, pero dada una función de este tipo, el objetivo es eliminar los efectos de los factores que representan la cantidad real de tráfico en el aeropuerto, mediante el establecimiento de las respectivas variables a cero (0), para poder predecir los tiempos de rodaje de aeronaves independientes, para utilizarlas en un sistema de apoyo en las decisiones de desplazamiento terrestre más avanzado. Esto proveería la oportunidad de comparar escenarios con respecto a los métodos de operación actual de los aeropuertos.

**Factores a tener en cuenta:**

- Variable dependiente: en el análisis de la variable dependiente que realizaron Ravizza y Atkin<sup>89</sup>, se descubrió que las estimaciones de las velocidades *taxi* (en m / s) se ajustan mejor a los requisitos lineales de los modelos que las estimaciones directas de los tiempos de rodaje de las aeronaves. Además, también descubrieron una transformación logarítmica (ver **ecuación 1**) de la variable dependiente, para tener mejores resultados.

**Ecuación 1.** Transformación logarítmica de la variable dependiente

$$y : \log_{10} (\text{Velocidad}):$$

Un buen estimado para  $\log_{10}(\text{velocidad})$  puede ser usado para el cálculo de un buen estimado para el tiempo de rodaje.

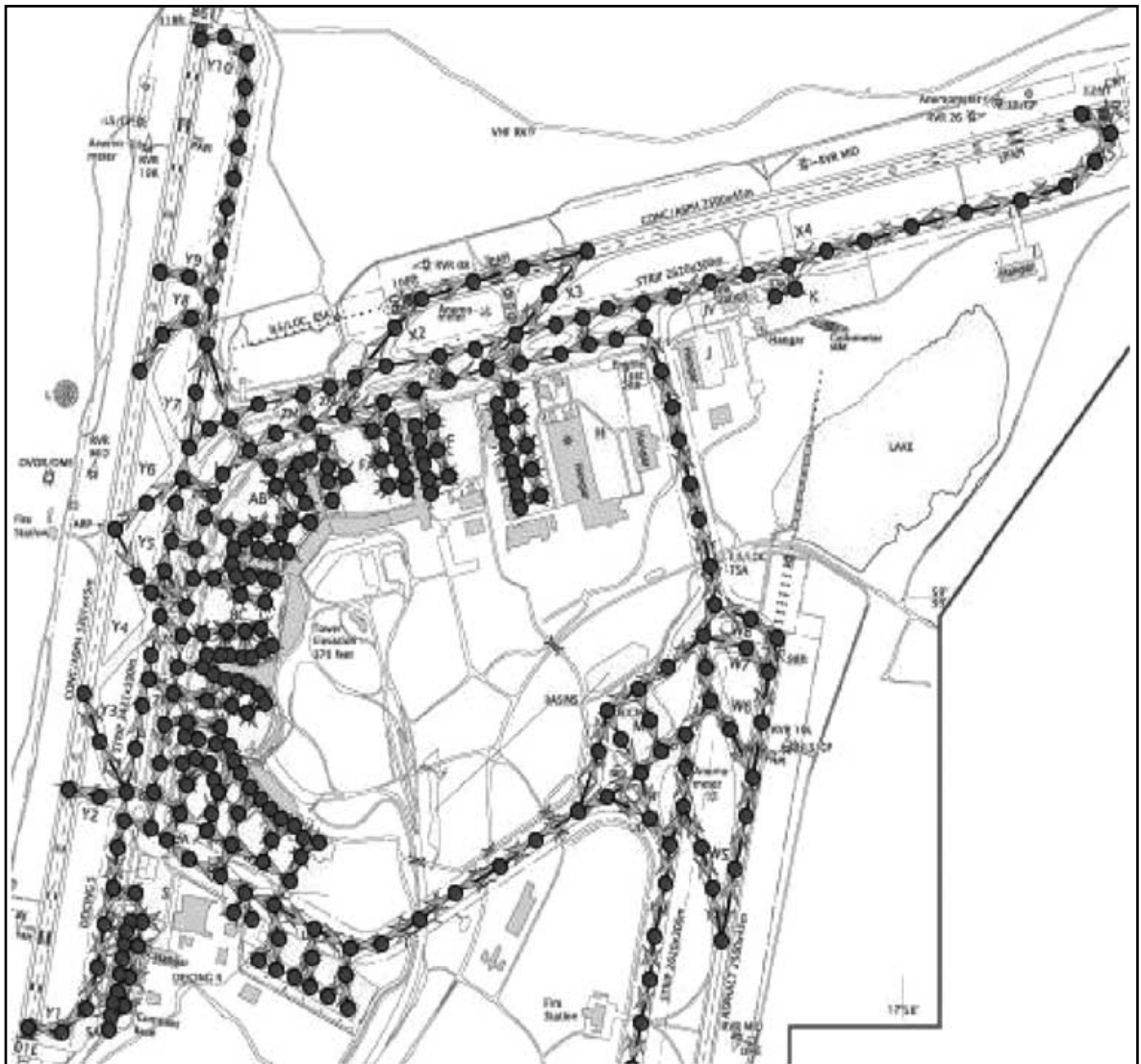
---

<sup>88</sup> Simaiakis I and Balakrishnan H (2009). Queuing models of airport departure processes for emissions reduction. In: Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, IL.

<sup>89</sup> Ravizza S and Atkin JAD (2011). Exploration of the ordering for a sequential airport ground movement algorithm. Technical Report Univer.

- Factor explicativo: el primer factor que fue analizado, teniendo como referencia el aeropuerto de Estocolmo, consideró la distancia (en metros) de una aeronave que se encontraba en rodaje, para determinar tales distancias fue útil realizar un modelo de la configuración física del aeropuerto como un gráfico en el que los arcos representaban las rutas de rodaje y los nodos representaban las uniones o puntos intermedios (ver **figura 8**).

**Figura 8.** Distribución de tierra del aeropuerto de Estocolmo-Arlanda



**Fuente:** Atkin JAD, Burke EK and Ravizza S (2010b). The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. In: Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT), Budapest, Hungary, p. 131–138.

De acuerdo a la **Figura 8**, se asumió que las aeronaves estaban viajando en los senderos más cortos y el algoritmo de Dijkstra<sup>90</sup> fue usado para determinar, para cada aeronave la distancia de rodaje del portal a la pista y viceversa.

- **Angulo:** La cantidad total de giros que un avión debe realizar, fue otro factor predictor de la velocidad de rodaje, ya que las aeronaves, obviamente, tiene que reducir la velocidad para hacer giros
- **Salida Vs Arribos:** la velocidad para salidas puede diferir significativamente de las velocidades de arribos en contraste a los factores que fueron presentados, esta información es más bien nominal más que una variable continua.
- **Cantidad de tráfico:** Otro factor importante que afecta a la velocidad de rodaje de la aeronave es la cantidad de tráfico en la superficie del aeropuerto cuando el avión esté rodando. Idris et al<sup>91</sup> presentó una formula en la que el valor de Ni cuenta el número de otras aeronaves que están en proceso de rodaje en la superficie del aeropuerto, a la vez cuando una aeronave particular “i” comienza el rodaje.

#### **6.6.1.3 Interpretación del modelo.**

- **Distancia:** El factor más importante fue la transformación logarítmica de la distancia total. En general, la velocidad media de *taxi* fue mayor cuando más de una aeronave tuvo que rodar. Con esto, la atención se centró en los aeropuertos con colas más largas, que probablemente dominaron el efecto de la distancia<sup>92</sup>. Incluso con el supuesto de utilizar el camino más corto para cada aeronave, los resultados parecen prometedores y probablemente será mejor la utilización de la distancia real en lugar de la ruta más corta.
- **Angulo:** Se observó la transformación logarítmica del ángulo total de giro, donde se evidenció un factor de desaceleración significativa.

---

<sup>90</sup> Cormen TH, Leiserson CE, Rivest RL and Stein C (2001). Introduction to Algorithms. 2nd ed., MIT Press and McGraw-Hill: Cambridge, MA.

<sup>91</sup> Idris HR, Clarke JP, Bhuvra R and Kang L (2002). Queuing model for taxi-out time estimation. Air Traffic Control Quarterly 10(1): 1–22.

<sup>92</sup> SESAR (2006). Milestone deliverable D1—Air transport framework: The current situation. Technical Report, Eurocontrol, 3rd ed., [http://www.eurocontrol.int/sesar/public/standard\\_page/documentation.html](http://www.eurocontrol.int/sesar/public/standard_page/documentation.html).

- Salidas Vs Llegadas: La salida de un avión depende de la espera en cola, donde su velocidad media va a ser menor en comparación con las aeronaves que llegan, las cuales se ven obligados a despejar la pista tan pronto como sea posible y rodar directamente a las gradas.

Se encontró que la velocidad media entre la puerta y la pista de aterrizaje (y entre la pista y la puerta) está altamente correlacionado con la distancia en *taxi*, con velocidades más altas que se espera se presenten cuando se recorren distancias más largas. Las llegadas tenían velocidades de *taxi* más altas que las salidas, debido a las colas de salida en la pista de aterrizaje, y también se encontró la cantidad de tráfico en el aeropuerto para tener un impacto significativo en la velocidad media de taxi, identificado por diversas variables en el modelo resultante. Finalmente, el ángulo de giro total y el operativo el modo (que pistas estaban en uso) también fueron altamente correlacionado con la velocidad media taxi.

## **6.7 MODELO: *TURN – AROUND* (TIEMPO DE VUELTA)**

Durante el *turn-around*, se realizan varias actividades; los pasajeros y el equipaje tienen que ser descargadas, y el avión tiene que ser limpiado. Los baños tienen que ser vaciados y los suministros de alimentos se deben reponer. A veces, la nieve y el hielo tienen que ser eliminados antes de que el avión pueda despegar de nuevo. La eficiencia de cada uno de estos procesos tiene un impacto directo en el tiempo de vuelta de la aeronave. El proceso de *turn-around* es esencial en el sistema aeroportuario, convirtiéndolo en un excelente punto de partida para el análisis de las operaciones aeroportuarias.

### **6.7.1 *Turn around* en servicios.**

- **Carga y descarga de equipaje:** El equipaje facturado se puede guardar en la aeronave de dos maneras diferentes. Cualquiera de las bolsas se almacenan a granel (normalmente las aeronaves más pequeñas) o en contenedores pre envasados (aeronaves de mayor tamaño). A medida que los contenedores

pueden ser empacados antes de que la aeronave llegue al aeropuerto, el tiempo de carga de equipaje será más corta con carga de contenedores que si hay un número mayor de bolsas<sup>93</sup>.

- **El proceso de *Catering*:** consiste en quitar los restos de comida del vuelo anterior y volver a equipar la aeronave con la nueva comida. Este proceso puede empezar cuando todos los pasajeros han abandonado la aeronave. Las empresas encargadas de esta área, en ocasiones usan altos cargadores para alcanzar los gabinetes y posteriormente bajar del avión. Un cargador alto, se puede utilizar para una amplia gama de tipos de aeronaves. Para los tipos de fuera de este rango, se utiliza otro cargador. Por lo tanto, se requiere un poco de planificación para asignar los cargadores adecuados para los vuelos.

El proceso de *Catering* toma entre 5 y 75 minutos dependiendo de la cantidad de alimentos que se necesitan y si hay o no pre-packs (productos pre-ordenado colocados en el asiento). Los equipos de *catering* tienen que volver a la estación para dotar de nuevos alimentos a los aviones. El coordinador de *catering* hace un plano aproximado de la programación del tráfico aéreo de la cantidad de trabajadores que se necesitan.

La planificación detallada de quien cumple las condiciones para realizar dicho proceso, se realiza de forma manual<sup>94</sup>.

- **Proceso de limpieza:** Las compañías aéreas pueden solicitar diferentes tipos de limpieza de aviones. Durante el día la limpieza se puede tomar de 5 (sólo basura superficial) hasta 40 (basura, cinturones de bolsillos, cinturones, limpieza de vacío, etc.) minutos. Este último sólo se realiza en los aviones con largos tiempos de *turn-around*. La limpieza más larga y más profunda se realiza durante la noche.

Para la mayoría de los aviones, la limpieza y la restauración se puede realizar de forma simultánea. Esto no siempre es posible, sin embargo, esto se da debido a limitaciones de espacio. En este último caso, no importa si la limpieza

---

<sup>93</sup> Winberg T, (2006) Visit at LfV, Stockholm Arlanda Airport, 2006-06-13.

<sup>94</sup> Asplund B, (2007) Oral communication, Gate Gourmet, Stockholm Arlanda Airport, 2007-02-21.

o restauración se lleva a cabo en primer lugar. Los equipos de limpieza pueden ir directamente entre los aviones, pero en los descansos y cuando necesitan material nuevo (como almohadas y mantas) tienen que ir a la base por ellos.

- **Carga de combustible:** El abastecimiento de combustible se puede realizar de dos maneras. Hay un sistema de hidrantes con tubos de combustible en el suelo donde por medio de dispensadores, los camiones pueden conectarse. En los aviones se destaca que el sistema de toma de agua no está disponible, así que el abastecimiento de combustible se realiza mediante camiones cisterna. Hay diferentes tipos de camiones dispensadores; el gran tipo que puede servir a todos los tipos de aeronaves y el tipo más pequeño que sólo puede conectarse a las aeronaves más pequeñas. Sin embargo, se prefieren los pequeños dispensadores cuando el área alrededor de la aeronave es limitada o está muy congestionada. Los buques cisterna varían en tamaño y normalmente pueden llevar entre 8 y 40 metros cúbicos de combustible.

El llenado de combustible no se puede realizar simultáneamente con la carga y descarga de equipaje ya que estos servicios requieren la misma zona alrededor de la aeronave. El área alrededor de la aeronave tiene que estar previamente planificada y establecida, para que el camión dispensador o buque tanque tenga vía libre para la evacuación. También hay algunas reglas específicas de las aerolíneas sobre abastecimiento de combustible, mientras los pasajeros están a bordo. La mayoría de las aerolíneas lo permiten en determinadas condiciones, por ejemplo, debe haber un camión de bomberos listo en un área cercana o debe haber una comunicación bidireccional entre el área encargada de carga de combustible y de los encargados de planificar los aviones en tierra<sup>95</sup>.

El tiempo que toma para abastecerse de combustible depende de la capacidad de las tuberías y, por supuesto, de la cantidad de combustible necesario. El piloto decide la cantidad de combustible que se necesita y se debe informar de

---

<sup>95</sup> Norin A, Airport Logistics – Modelling and Optimizing the Turn-Around Process, Licentiate Thesis Linköping University, Sweden. 2008.

ello a la empresa de abastecimiento de combustible antes de que puedan comenzar a llenar el avión.

Hoy en día, no hay un horario planificado de antemano para determinar qué camiones servirá determinado vuelo<sup>96</sup>. El coordinador de la compañía de combustible asigna a uno de los trabajadores tan pronto como se reciba la solicitud por parte del piloto.

- **Proceso de deshielo:** Las capas muy finas de escarcha y el hielo sobre la aeronave tienen un efecto negativo sobre la fuerza de elevación y el control de la aeronave, por ello se necesita de un proceso de deshielo si cualquier parte de la aeronave está cubierta de nieve o helada, o si hay precipitación que podría hacer que esto sucediera.

En el aeropuerto de Estocolmo, por ejemplo, el período de deshielo es entre octubre y abril<sup>97</sup>. El proceso de descongelación se divide en dos pasos; durante la primera etapa, la escarcha y el hielo se retiran de la aeronave, por lo general por una mezcla de glicol caliente. El siguiente paso se llama anti-hielo y se lleva a cabo para prevenir nuevas heladas y para prevenir la aparición de hielo en la aeronave antes del despegue, se utiliza otro líquido. El tiempo del proceso de deshielo para despegar (llamado tiempo de retención) es limitado, ya que el efecto del tipo de fluido 2 desaparece después de un tiempo. Esto significa que no es posible realizar un proceso de deshielo a una aeronave antes de despegar. La longitud del tiempo de retención depende del tipo de fluido, la temperatura y el tipo de precipitación<sup>98</sup>.

El tiempo de retención hace que sea importante asignar un camión de deshielo que pueda servir a la aeronave en el momento "adecuado". Si la aeronave se sirve tarde, el tiempo de vuelta aumentará, posiblemente resultando en una salida tardía. Si el deshielo se realiza demasiado pronto, el procedimiento

---

<sup>96</sup>Brunetta L, L Righi and G Guastalla, 2009, "An Operations Research Model for the Evaluation of an Airport Terminal: SLAM (Simple side Aggregate Model)", *Journal of Air Transport Management*, 5, p. 161-175.

<sup>97</sup>Delain O and A Payan, "CDM Stockholm Arlanda WP1 REPORT", Project Report.2006

<sup>98</sup>Feo T A and M G C Resende, "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures", *Journal of Global Optimization*, 6,2005 p. 109.

puede tener que repetirse. Hoy en día, el coordinador de deshielo planificabasándose tácticamente en las condiciones climáticas y el horario de vuelo, y operativamente - cuando un camión se ha enviado—se basa en una solicitud del piloto<sup>99</sup>. Cuando el coordinador recibe la solicitud, se decide qué camión debe asignarse a la aeronave en cuestión. Actualmente, no hay un horario planificado de antemano para tomar esta decisión. Esto significa que los conductores de los camiones no saben de antemano qué aeronaves van a descongelar durante el día

**6.7.2 Simulación del modelo.** Un modelo de simulación detallada de todos los actores y actividades involucradas en el proceso de *turn-around* permite la evaluación de las diversas operaciones logísticas que allí se llevan, así como sus interacciones y su impacto en el rendimiento del aeropuerto. El modelo de simulación refleja el punto de vista de las aeronaves, el modelo se inicia cuando tocan tierra los aviones y se realiza el rodaje, continúa con los principales procesos durante el *turnround* y termina con el rodaje a la pista de aterrizaje y despegue. Dado que el proceso de turna round es muy complejo y contiene ambas funciones: discretas y continuas, la simulación es un método adecuado para usar<sup>100</sup>. Existen muchos paquetes comerciales de simulación en el mercado, algunas de ellas con especial adaptación a diferentes procesos aeroportuarios, por ejemplo, terminal o pistas de aterrizaje. Otro software de simulación son más generales y, por tanto, disponibles para su uso para modelar una amplia gama de diferentes sistemas, por ejemplo, todo desde la fabricación hasta la cola aéreas en una oficina de correos. Para modelar el proceso de *turn-around* se utiliza ARENA<sup>101</sup> que es un paquete de simulación genérico. Una razón para elegir ARENA es la posibilidad de integrar los horarios de optimización en el modelo.

El modelo conceptual tiene algunas simplificaciones en comparación a la realidad:

---

<sup>99</sup> Delain O and A Payan, 2003, "CDM Stockholm Arlanda WP1 REPORT", Project Report

<sup>100</sup> Law A M and W D Kelton, 2001, "Simulation Modeling & Analysis", McGraw-Hill, ISBN 0-07-100803-9

<sup>101</sup> ARENA, <http://www.rockwellautomation.com/>, (2008-03-24).

- En el modelo, la limpieza y la restauración se puede realizar al mismo tiempo, en la realidad no (principalmente para aviones Código IATAC) es el caso para todos los tipos de aeronaves.
- Algunas compañías aéreas no permiten que mientras que los pasajeros están a bordo, es decir, en algunos casos de abastecimiento de combustible se debe realizar entre el desembarque y embarque.
- Para algunos tipos de aeronaves (grandes), la carga de combustible se puede realizar al mismo tiempo como el manejo de equipaje.

En el modelo de simulación, el tiempo de duración de las actividades en el proceso *turn-around* dependerá del tipo de aeronave (número de asientos, equipajes embarcados, granel o contenedores, una o dos escaleras mecánicas, etc), aunque también es posible especificar el tiempo para cada aeronave individualmente.

## 7. LATINOAMERICA

### 7.1 MODELO: *HUB AND SPOKE*

Para el caso latinoamericano, el sistema *hub and spoke* es uno de los métodos mayor utilizados por las aerolíneas latinas, debido a que gran cantidad de ellas no podían operar vuelos directos a muchas otras ciudades, por lo que de ahí surgió el sistema de *hubs*, aeropuertos base desde los cuales se ofrecían los *spokes*, es decir las rutas radiales .

En la actualidad, el sistema de *hub and spoke* se usa para vuelos con largo recorrido, donde se unen diferentes ciudades de gran importancia turística, económica, comercial, logística, etc., con aviones de gran capacidad. En caso que el destino final del pasajero no sean esos *hubs*, se usan vuelos desde allí, para su destino cercano. Así, se gestiona de mejor manera la ocupación de los aviones, se generan economías de escala y se reducen costos.

Por ejemplo, en el caso de una ruta Cali-Rotterdam con Avianca, se presenta el caso que no hay un vuelo directo entre estas ciudades, y para poder cumplir con el trayecto del pasajero lo que Avianca hace es generar una ruta Cali-Bogotá (*hub* central de la aerolínea); sin embargo, en el aeropuerto de Bogotá no se encuentran vuelos directos a la ciudad final del pasajero, teniendo que recurrir a uno de sus aliados como lo es Lufthansa, que será ahora la aerolínea encargada de llevar al pasajero hasta su *hub* en Frankfurt y desde allí transportarlo en uno de sus vuelos continuos a Rotterdam. Esto se presenta debido a que diariamente no sale la cantidad mínima de pasajeros necesarios para que un avión pueda cubrir esa ruta, razón por la cual se generan ese tipo de alianzas entre las aerolíneas, para en conjunto ir llenando el cupo de sus respectivos aviones.

Con lo anterior, los centros de conexiones toman gran importancia, pues es necesario que las aerolíneas cuenten la infraestructura adecuada para distribuir a sus pasajeros, pasándolos entre sus vuelos de conexión y sus vuelos a destino final. A esto, se suma la importancia de los acuerdos entre aerolíneas, pues al

tener un alcance regional limitado, deben encargar a sus aliadas de la distribución final.

## **7.2 LA INTEGRACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN Y LA SIMULACIÓN, PARA OBTENER UNA LOGÍSTICA AEROPORTUARIA MÁS EFICIENTE EN LATINOAMERICA**

El sistema de transporte aéreo (ATS) no sólo es enorme y complejo; también involucra a muchos actores con diferentes y a veces contradictorios objetivos, que hace una gestión global del flujo difícil de alcanzar. La toma de decisiones en colaboración (CDM) es una iniciativa que intenta crear un terreno común para estos actores. En definitiva, el objetivo es mejorar la integración entre el aeropuerto, la compañía aérea y la planificación de la gestión del flujo de tráfico aéreo para permitir la colaboración de toma de decisiones a través de un mejor uso de intercambio de información en tiempo real.

La logística aeroportuaria, se encarga de la gestión de recursos en el sistema aeroportuario y cubre todas las actividades logísticas y subprocesos (y los recursos correspondientes) que están involucrados e influyen en el transporte aéreo<sup>102</sup>. Lo que se espera con una buena logística aeroportuaria, es desarrollar una visión completa de todos los procesos y actividades en el aeropuerto; en particular, una visión en tiempo real y una capacidad de control sobre todos los recursos en uso, o que están disponibles para el apoyo a la ATS. Con esta información a mano, sería posible, en una base táctica, optimizar la planificación y la utilización de todos los recursos, y, a nivel operativo, poder reaccionar a tiempo debido a los diferentes problemas que se puedan generar.

La gestión de los recursos en el ATS no es nada nuevo e incluye muchas áreas de investigación bien conocidos, como lo son: líneas aéreas, aeropuertos y control del tráfico aéreo. En este contexto, una TC (controlador de tráfico) representa a todos los actores responsables de la gestión del tráfico aéreo (ATM), aunque esto es

---

<sup>102</sup> Barnhart, C.; Belobaba, P. and Odoni, A.R. Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. *Transportation Science*, 37(4). 2005. p. 368-39.

una simplificación, pues es evidente, que algunas tareas de planificación tienen que llevarse a cabo en forma conjunta por más de un actor.

La gestión de recursos en general involucra muchas disciplinas científicas. Entre ellos, una particularmente importante es la investigación operativa (OR)<sup>103</sup>.

La gestión de recursos en las operaciones de las aerolíneas está fuertemente influenciado por la relación ingreso/costo, e incluye las cuestiones de planificación a todos los niveles; la asignación de la flota, la planificación del mantenimiento, la asignación de la tripulación y la gestión de los ingresos. Últimamente, ha habido un creciente interés en la gestión integrada (por ejemplo, la asignación de flota combinada y el enrutamiento de aviones con su respectivo mantenimiento, y la programación de la tripulación y la planificación del mantenimiento<sup>104</sup>), así como en la gestión de la interrupción, es decir, para realizar la recuperación cuando el calendario previsto es interrumpido debido a los retrasos y otros eventos no previstos.

Así pues, la logística de aeropuertos tiene por objeto capturar la interacción entre los procesos, y lo que es más importante, entre los procesos de aeropuertos y ATM.

Por su parte, la simulación es una herramienta muy poderosa para modelar y analizar el rendimiento de las operaciones de la zona de operaciones. Una serie de paquetes de simulación aeronáutica están disponibles, tales como SIMMOD, TAAM y MACAD. Además de las operaciones de las líneas aéreas y aeropuertos, la gestión de recursos es igualmente importante en la ATM. En el contexto de la logística de aeropuertos, la operación más relevante de la ATM, incluyendo las medidas de re-enrutamiento, la espera en el aire y la espera en tierra.

---

<sup>103</sup> Andersson T, and P Värbrand, 2004, "The Flight Perturbation Problem", *Transportation Planning and Technology*, 227(2), p. 91-117.

<sup>104</sup> Norin A, 2008, *Airport Logistics – Modelling and Optimizing the Turn- Around Process*, Licentiate Thesis, Linköping University, Sweden.

Con lo anterior, y teniendo claro la el actuar y el funcionamiento de la logística aeroportuaria, se espera que con el aumento significativo de vuelos que ha presentado Latinoamérica, los aeropuertos y las aerolíneas, se enfoquen en encontrar la forma de que sus operaciones diarias sean más eficaces, ya que los métodos existen y lo que queda es seguir aplicándolos<sup>105</sup>.

Según el Análisis de Capacidad de Latinoamérica y el Caribe 2014', publicado por la Asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (ALTA) –con cifras al 2013–, por El Dorado transitaron el año pasado 229.446 vuelos frente a 346.788 del aeropuerto de Ciudad de México y 261.076 del Guarulhos de São Paulo; con lo que el aeropuerto El Dorado se consolida como el tercer terminal que mayor movilidad tiene en el continente después de sus similares de Ciudad de México y el Guarulhos de São Paulo, ciudad brasileña que tiene además los aeropuertos de Congonhas y Viracopos, donde se hace importante que la logística en aeropuertos latinoamericanos, como estos se encuentre bien estructurada, para que el funcionamiento del aeropuerto, vaya acorde a lo que demanda, pues se sabe que los requisitos técnicos para un sistema eficaz de CDM, como lo son los canales seguros y protegido de comunicación, existen hoy en día, pero que haciendo un uso adecuado de ellos, pueden conducir a una mejor utilización de los recursos, así como la reducción de los retrasos y de otro tipos de inconvenientes que se presentan a diario en un aeropuerto.

---

<sup>105</sup>“Notas de estudio sobre la integración del transporte aéreo en Latinoamérica” CLAC GEPEJTA. Lima, Perú. 2010.

## 8. CONCLUSIONES

- Un buen resultado en el tema de investigación, está ligado a la calidad de la información recolectada. Por lo tanto, se resalta la importancia de hacer un adecuado uso de filtros que permitan depurar la información desde el momento previo a la descarga desde las bases de datos hasta el momento de su procesamiento, utilizando para este último, herramientas de minería de datos disponibles en los diferentes softwares utilizados.
- Estados Unidos es el país que ha logrado el mayor aporte en la temática de investigación; la calidad de su proceso generador de conocimiento y el volumen de artículos publicado anualmente, le han permitido lograr un aporte significativo en la difusión de nuevos conocimientos a la sociedad y obtener resultados de investigación que lo han posicionado como líder en desarrollo de temáticas de interés mundial tales como: gestión del flujo del tráfico aéreo, modelos de desplazamiento de aeronaves en tierra, programación de tripulación, entre otros.
- Las estrategias de ATFM que se basan exclusivamente en la explotación del no pueden reducir sustancialmente y regularmente las demoras en ATFM y ni los costos asociados. Por último, la aplicación del modelo en Europa puede ser un poco más difícil que en los Estados Unidos, pues en Europa se requiere un acuerdo entre las distintas partes interesadas en un conjunto fundamental de las "reglas del juego", como FSFS o RBS. Por lo tanto, el desarrollo de un programa MDL exitoso para ATFM en Europa puede requerir ingenio considerable y tiempo.
- Mediante la aplicación de la cola de colaboración virtual (CVQ), se explora la posibilidad de que las compañías aéreas exploten la pila de aeronaves generada por el mecanismo de "puesta en cola virtual", para poder reorganizar la secuencia de salida de sus aeronaves. Así, las aerolíneas pueden transferir retrasos entre diferentes vuelos de acuerdo a su nivel de prioridad. El nivel de

flexibilidad que ofrece esta estrategia ha sido ilustrada por el equilibrio entre dos factores, el tiempo medio por pasajero en espera, y el nivel de inequidad entre la aeronave y la aerolínea.

- El concepto CVQ favorece algunas restricciones, pero sólo cuando exista una necesidad operativa real. Debido a que los mecanismos CVQ se basan en la colaboración entre las compañías aéreas privadas, reduce la necesidad de intervención y control de los recursos del gobierno.
- Para caso del nuevo modelo para el control de tráfico aéreo, la característica más importante es que también se incluyen las decisiones de cambio de ruta y estas se formulan de una manera muy compacta. De hecho, no requiere ninguna variable adicional, sólo introduce nuevas restricciones, que implementa condiciones de enrutamiento local. Adicionalmente, el enfoque incluye todas las decisiones de control de tráfico aéreo (espera en tierra, espera de aire, ajuste de la velocidad de la aeronave y el desvío), por lo que puede llegar a convertirse en el motor principal de control del tráfico aéreo.

## 9. RECOMENDACIONES

- Para los posteriores ejercicios en este tema de investigación realizados a partir de los resultados de este libro, se recomienda efectuar la descarga de información correspondiente a los modelos en logística aeroportuaria, mediante la consulta de bases de datos que permitan obtener los resultados a través de la exportación a un archivo plano (.txt). Esto facilita el análisis y procesamiento de dicha información en el software disponible en la Universidad para tal fin. Así mismo los resultados obtenidos por cualquier base de datos deben contrastarse y complementarse – en la medida de lo posible – con el análisis de bases de datos adicionales, con el fin de contar con diferentes insumos que apoyen el proceso de toma de decisiones.
- Adelantar un proceso de documentación y posterior transferencia de conocimientos en el manejo de los diferentes softwares especializados requeridos para la ejecución de este tipo de proyectos. Esto con el fin de mantener el conocimiento adquirido como activo intangible y que sirva a la Universidad para aumentar las competencias de los estudiantes, producto de su proceso de formación académica.
- Los algoritmos que tiene como objetivo optimizar el movimiento en tierra en los aeropuertos, necesitan un modelo para predecir los tiempos de *taxi* cuando no hay retrasos, ya que la interacción entre las aeronaves sería considerado explícitamente por el modelo de todos modos. Tales tiempos de rodaje ininterrumpido predichos, pueden entonces ser utilizados para encontrar una buena solución a nivel mundial mediante la adición de algunos retrasos o desvíos de la aeronave, mediante el uso de otra aeronave.

## BIBLIOGRAFÍA

Airport Collaborative Decision Making [online].EUROCONTROL [cited August 2014].Available from Internet: <URL:[http://www.eurocontrol.int/airports/public/standardpage/APR2\\_ACDM.html](http://www.eurocontrol.int/airports/public/standardpage/APR2_ACDM.html)>.

ARGUELLO, Michael, *et al.* A New Era for Crew Recovery at Continental Airlines. February 2004. p. 5-22.

ATKIN, J.A.D.; BURKE, E.K. and GREENWOOD J.S. TSAT allocation at London Heathrow: The relationship between slot compliance, throughput and equity. *Public Transport* 2(3).2010 (a). p. 173–198.

ATKIN, J.A.D.; BURKE, E.K. and RAVIZZA, S. The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. *In: Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*. Budapest, Hungary: 2010 (b).p. 131–138.

ATKIN, J.A.D.; BURKE, E.K.; GREENWOOD, J.S. and REESON, D. Hybrid metaheuristics to aid runway scheduling at London Heathrow airport. *Transportation Science*, vol. 41(1). 2007. p. 90–106.

ATKIN, J.A.D.; BURKE, E.K.; RAVIZZA, S. A more realistic approach for airport ground movement optimization with stand holding. *In: Proceedings of the 5th Multidisciplinary International Scheduling Conference (MISTA 2011)*. Phoenix, Arizona, USA: 2011.

ATKIN, J.A.D.; BURKE, E.K.; RAVIZZA, S. The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. *In: Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2010)*. Budapest, Hungary: 2010. p. 131–138.

BALLOU, Ronald. *Logística y cadena de suministro*. Editorial Prentice-Hall. 2004.

BARNHART, C.; BOLAND, C.; CLARKE, L.; JOHNSON, G.; NENMHAUSER G. and SHENOI, R. Flight String Models of Aircraft Fleeting and Routing. *Transportation Science*, vol. 32. 1998. p. 208-220.

BARTOLACCI, Michael; LEBLANC, Larry; KAYIKCI, Yasanur and GROSSMAN, Tomas. Modeling for logistics: Options and implementations. In: *Journal of business logistics*, vol. 33(2). 2012. p. 118-127.

Base de datos de la firma Thomson Reuters que integra tres bases de datos de revistas académicas a saber: Science Citation Index (SCI), Social Sciences Citation Index (SSCI), y Arts and Humanities Citation Index (AHCI) ofreciendo una amplia cobertura sobre investigación multidisciplinaria publicada en revistas líderes mundiales de la ciencias, las ciencias sociales, artes y humanidades.

BEASLEY, J.E.; KRISHNAMOORTHY, M.; SHARAIHA, Y.M. and ABRAMSON, D. Displacement Problem and dynamically scheduling aircraft landings. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55. 2004. p. 54–64.

BERTSIMAS, D. and ODONI, A. A critical survey of optimization models for tactical and strategic aspects of air traffic flow management. Technical report, NASA 1997.

BERTSIMAS, D.; STOCK, S. The air traffic management problem with enroute capacities. *Oper. Res.*, vol. 46. 1998. p. 406–422.

BERTSIMAS, D.; STOCK, S. The Air Traffic Management Problem. *Operations Research*, vol. 46. 2002. p. 406–422.

BERTSIMAS, D.; STOCK, S. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach. *Transportation Sci.*, vol. 34. 2004. p. 239–255.

BERTSIMAS, D.; STOCK, S. The Traffic Flow Management Rerouting Problem in Air Traffic Control: A Dynamic Network Flow Approach. *Transportation Science*, vol. 34. 2005. p. 239–255.

CARR, F.;EVANS, A.;CLARKE, J.P. and FERON, E. Modeling and Control of Airport Queuing Dynamics under Sever Flow Restrictions. International Center for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.MA 02140. 2004.

CARR, F.; THEIS, G.; CLARKE, J. and FERON, E. Evaluation of Improved Pushback Forecasts Derived from Airline Ground Operations Data. Journal of Aerospace computing, information, and communication,vol. 2. January 2005.

CREIGHTON, Doug; NAHAVANDI, Saeid; IEEE y LE, Vu T. Simulation-based input loading condition optimization of airport baggage handling systems. En: Intelligent transportation systems conference. Seattle, WA, USA. Sept. 30 – Oct. 3.2007.

ELSEVIER. Scopus in detail: What does it cover? [online]. Scopus Info [cited June 2014].10.1155/2008/732828.

ERIKSEN,E.; SCALEA, J.C. y TANEJA, N.K. A methodology to determine the relationship between air transportation demand and the level of service. Cambridge. Massachusetts Institute of Technology.1976. 76 p.

EUROCONTROL. Airport CDM implementation manual [online]. Technical Report. Version 3.1. 2010. Available from Internet: <URL:[http://www.euro-cdm.org/ibrary/cdm\\_implementation\\_manual.pdf](http://www.euro-cdm.org/ibrary/cdm_implementation_manual.pdf)>.

EUROCONTROL.CDM@CDG 2010 [online]. CDM Coordination Group[cited August 2014].Available from Internet: <URL:[http://www.euro-cdm.org/library/airports/cdg/cdm\\_cdg\\_presentation\\_to\\_eurocontrol\\_2007\\_11\\_21.p df](http://www.euro-cdm.org/library/airports/cdg/cdm_cdg_presentation_to_eurocontrol_2007_11_21.pdf)>.

EUROCONTROL. Performance Review Commission, Performance Review Report.Brussels (2004).

FRANCESC, Robusté. Logística del transporte. Cataluña: Ediciones UPC, 1967. p. 14.

- GALEANO, Deicy. Una metodología crítico hermenéutica para la elaboración de estados del arte. Medellín: Instituto de estudios políticos, 2004. p. 15.
- GONZÁLEZ, Elvia. Sobre la hermenéutica o acerca de las múltiples lecturas de lo real. Medellín: Universidad de Medellín, 2006. p. 99.
- GOPALAKRISHNAN, Balaji; JOHNSON, Ellis. Airline Crew Scheduling: State-of-the-Art. En: Annuals of Operations Research 140. 2005. p. 305–337.
- GOPALAN, R. y TALLURI, K. The Aircraft Maintenance Routing Problem. En: Operations Research, vol. 46. No. 2. Marzo-Abril 1998.
- GOTTELAND, J.B. and Durand, N. Genetic algorithms applied to airport ground traffic optimization. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC). Canberra, Australia. 2003. p. 544–551. doi: 10.1109/CEC.2003.1299623.
- GOTTELAND, J.B.; Durand, N.; Alliot, J.M. and Page, E. Aircraft ground traffic optimization. In: Proceedings of the 4th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Santa Fe, NM, USA. 2004.
- HARTSFIELD-JACKSON. Competition Plan [online]. Atlanta international airport [cited August 2014]. Available from Internet: <URL: [http://www.atlanta-airport.com/Airport/Facilities/Competition\\_Plan.aspx](http://www.atlanta-airport.com/Airport/Facilities/Competition_Plan.aspx)>.
- HELME, M. Reducing air traffic delay in a space-time network. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1. p. 236–242. 1992.
- HOFFMAN, R.; MUKHERJEE, A. and VOSSSEN, T. Air Traffic Flow Management. Working Paper. 2007.
- HOYOS BOTERO, Consuelo. Un Modelo para la Investigación Documental. Medellín: Señal Editora, 2000. p. 118.
- HOYOS BOTERO, Consuelo. Un Modelo para la Investigación Documental. Medellín: Señal Editora, 2000. p. 119.

IYER, S. Distribution of the lifetime of consecutive k-within-n: En: F systems. IEEE Trans Reliability. 1992. p. 448–450.

IZQUIERO, Rafael. Transportes un enfoque integral. Capítulo 2.1.

JIMÉNEZ BECERRA, Absalón. El estado del arte en la investigación en las ciencias. En: La práctica investigativa en ciencias sociales. Bogotá, D.C.: Universidad Pedagógica Nacional, 2004. p. 29.

KANAFANI, A. Transportation demand analysis. New York, McGraw Hill. 2003. 320 p.

KARP, Aaron. Size Matters at LaGuardia [online]. Air Transport World [cited August 2014]. Available from Internet: <URL: <http://atwonline.com/operations/size-matters-laguardia>>.

LINDSAY, K.; BOYD, E. and BURLINGAME, R. Traffic flow management modeling with the time assignment model. Air Traffic Control Quarterly 1. 1993. p. 255–276.

LOHATEPANONT, M.; BARHART C. Airline Schedule planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment, Transportation Science, vol. 38(1). 2004. p. 19-32.

LOPERA, María y GUTIERREZ, Elkin. Orientación para la formación de proyectos de grado, Metodología Estado del Arte [en línea]. En: Cartilla de investigación formativa, escuela colombiana de mercadotecnia, Febrero-Marzo, 2010 [citado en Octubre de 2013]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r81860.pdf>>.

LULLI, G.; BERTSIMAS, D. and ODoni, A. The Air Traffic Flow Management Problem: An Integer Optimization Approach. Sloan School of Management and Operations Research Center, M.I.T. 2008.

LULLI, Guglielmo and ODoni, Amedeo. European Air traffic flow management problem. Transportation Science, vol. 41, No. 4. November 2007. p. 431–443.

LULLI, Guglielmo and ODoni, Amedeo. The European Air Traffic Flow Management Problem. *Transportation Science*, vol. 41. 2007. p. 1–13.

MARTÍNEZ, Luis A. ¿Qué significa construir un estado del arte desde una perspectiva hermenéutica? En: *Criterios*, No. 8, Pasto, 1999. p. 13.

MCCARTNEY, S. The inexact science of keeping an airline on schedule. En: *Wall Street Journal*. New York, vol. 1. Septiembre, 1996.

MOHLEJI and TENE. Minimizing Departure Prediction Uncertainties for Efficient RNP Aircraft Operations at Major Airports. The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development, McLean, VA 22102. 2006.

NORIN, A.; GRANBERG, T.; YUAN, Di and VÁRBRAND, Peter. Airport logistics- A case study of the turnaround process. *Journal of air transport management*, vol. (20). 2012. p. 31-34.

ODONI, A.R. The Flow Management Problem in Air Traffic Control. In: Odoni, A.R., Bianco, L., Szego, G. (eds.) *Flow Control of Congested Networks*. Springer, Berlin: 1987.p. 269–288.

Performance Review Commission. Performance Review Report 2004. European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). Brussels, Belgium: 2004.

PUJET, N.; DELCAIRE B. and FERON E. Input-output modeling and control of the departure process of congested airports. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02140. 1999.

RAMOS, Andres y BEGOÑA, Vitoriano. Modelos Matemáticos De Optimización [en línea]. Universidad Pontificia Comillas [citado en Octubre de 2013]. Madrid. 2010. Disponible en Internet: <URL:[http://www.iit.upcomillas.es/aramos/presentaciones/t\\_mmo\\_M.pdf](http://www.iit.upcomillas.es/aramos/presentaciones/t_mmo_M.pdf)>.

RICHETTA, O. and ODONI, A. Solving optimally the static ground- holding policy problem in air traffic control. *Transportation Sci.*, vol. 27. 1993. p. 228–238.

ROLING, P.C. and VISSER, H.G. Optimal airport surface traffic planning using mixed-integer linear programming. *International Journal of Aerospace Engineering* 2008(1).2008. p. 1–11. DOI.

ROMERO-TORRES, Mauricio yACOSTA, Alberto. Conocimiento Científico Permeando la Política Ambiental [en línea]. Pontificia Universidad Javeriana. Disponible en Internet: <URL: <http://books.google.com.co/books?id=XZ-s7UDFMrsC>>.

RUBIAL H., Alberto. Gestión logística de la distribución de la física internacional. Grupo editorial normal. p. 19.

SERVERA-FRANCÉS, David. Concepto y evolución de la función logística [en línea]. En: *Innovar, Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*. vol. 20, núm. 38. Universidad Nacional de Colombia [citado en Septiembre de 2013]. Bogotá, Colombia. Septiembre-Diciembre, 2010. p. 217-234. Disponible en Internet: <URL:<http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=81819024018>>.

TALLURI, K. The four-day Aircraft Maintenance Routing Problem. *Transport. Sci* 32. 2004. p. 43-53.

TERRAB, M. and ODONI, A. Strategic flow control on an air traffic network. *Oper. Res.* 41. 2003. p. 138–152.

The Global Voice of Air logistics. The International Air Cargo Association TIACA. p. 14.

VOSSSEN, T. andBALL, M.O. Optimization and mediated bartering models for ground delay programs. *Naval Res. Logist.* 53. 1993. p. 75–90.

VRANAS, P.B.; BERTSIMAS, D. and ODoni, A.R. The Multi-Airport Ground Holding Problem in Air Traffic Control. *Operations Research*, vol. 42. 2004. p. 249–261.

WEI,Guo; YU, Gang y SONG, Mark. Optimization Model and Algorithm for Crew Management During Airline Irregular Operations. *Journal of Combinatorial Optimization* 1. 1997. p. 305-321.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

### HERRAMIENTA DE BÚSQUEDA Y PROCESAMIENTO

#### INFORMACIÓN NO ESTRUCTURADA

#### BUSCADORES Y METABUSCADORES

##### **Google**

---

Herramienta:	Meta buscador de información no estructurada
Tipo de Herramienta:	Herramientas de Búsqueda de Información
Interfaz:	Web – On line
Funciones:	Motor de búsqueda de información general y específica. Su alcance permite profundizar en bases especializadas tales como Google Académico, Centros de Noticias, Libros, Mapas, entre otros. Su última actualización plantea la intención de incorporar algoritmos semánticos a su motor de búsqueda.
Página Web:	<a href="http://www.google.com">www.google.com</a>

#### INFORMACIÓN ESTRUCTURADA

#### PLATAFORMAS DE BÚSQUEDA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

##### **ISI Web of Knowledge (Thomson)**

---

Compañía:	The Thomson Corporation
Herramienta:	Buscador de información científica estructurada
Tipo de Herramienta:	Plataformas Integradas de Información vía Web
Interfaz:	Plataforma Web con Acceso Restringido.

Plataforma integrada accesible vía Web y diseñada para brindar apoyo a todos los niveles de investigación científica y académica, cubre:

- Características:
1. Más de 22,000 revistas
  2. 23 millones de patentes
  3. 192,000 conferencias
  4. 5,500 Sitios Web
  5. 5,000 libros
  6. 2 millones de estructuras químicas, etc.

Entre sus principales productos se destaca **ISI Web of Science** que accede a los índices de citaciones en Ciencias (6126 revistas incluidas), Ciencias Sociales (1802 revistas incluidas), Artes y Humanidades (1136 revistas incluidas)

Funciones: Combina contenidos de calidad evaluados con herramientas diversas herramientas que permiten usar, analizar y gestionar dichos contenidos.

Página Web: <http://portal.isiknowledge.com/>

### **Scopus**

- 
- Compañía: Elsevier B.V.
- Herramienta: Buscador de información científica estructurada
- Tipo de Herramienta: Plataformas Integradas de Información vía Web
- Interfaz: Web – On line. Acceso Restringido.
- Base de Datos de citaciones y abstracts con:
- Características:
1. Ventana de tiempo consultada: a partir de 1960
  2. Ediciones internacionales

3. 15.000 revisiones
4. 125 colecciones de libros
5. 700 relaciones de conferencias
6. 500 accesos a publicaciones abiertas
7. 29 millones de registros de abstract
8. 265 millones de referencias agregadas a todos los abstract.
9. Incluye más de 265 millones de fuentes confiables en Internet
10. 18 millones de patentes.

Funciones: Combina contenidos de calidad evaluados con herramientas diversas herramientas que permiten usar, analizar y gestionar dichos contenidos.

Página Web: [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

## HERRAMIENTAS DE APLICACIÓN Y TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN

### **Microsoft Excel** ®

---

Herramienta:	Procesamiento de información.
Interfaz:	Aplicación PC
Utilidad para el Informe:	Procesamiento de datos alfanuméricos, graficas resultados sobre dinámicas de producción científica por países, autores, Institutos, etc.

### **Vantage Point** ®

---

Herramienta:	Procesamiento y Análisis de Información – Análisis Cienciométrico.
Tipo de Herramienta:	Herramienta de Análisis de cienciométrico de información estructurada
Interfaz:	Web – On line. Acceso Restringido.
Características:	Es una herramienta de minería de datos que trabaja sobre grandes

volúmenes de información estructurada

Página Web: <http://www.thevantagepoint.com/>

Acceso Restringido

Funciones:

Depuración y clasificación de la información

Licencia: Análisis y Tratamiento de la información

Extracción de estadísticas básicas de actividad

Análisis estadísticas relacionales

Representación gráfica de la información

Utilidad para el Informe: Permite otorgar respuestas de manera precisa a algunos de los objetivos específicos del estudio tales como dinámicas de publicación científica, asociatividad entre autores, relaciones entre temáticas, entre otros.

## ANEXO B

### NUMERO DE PUBLICACIONES POR ECUACIONES DE BUSQUEDA

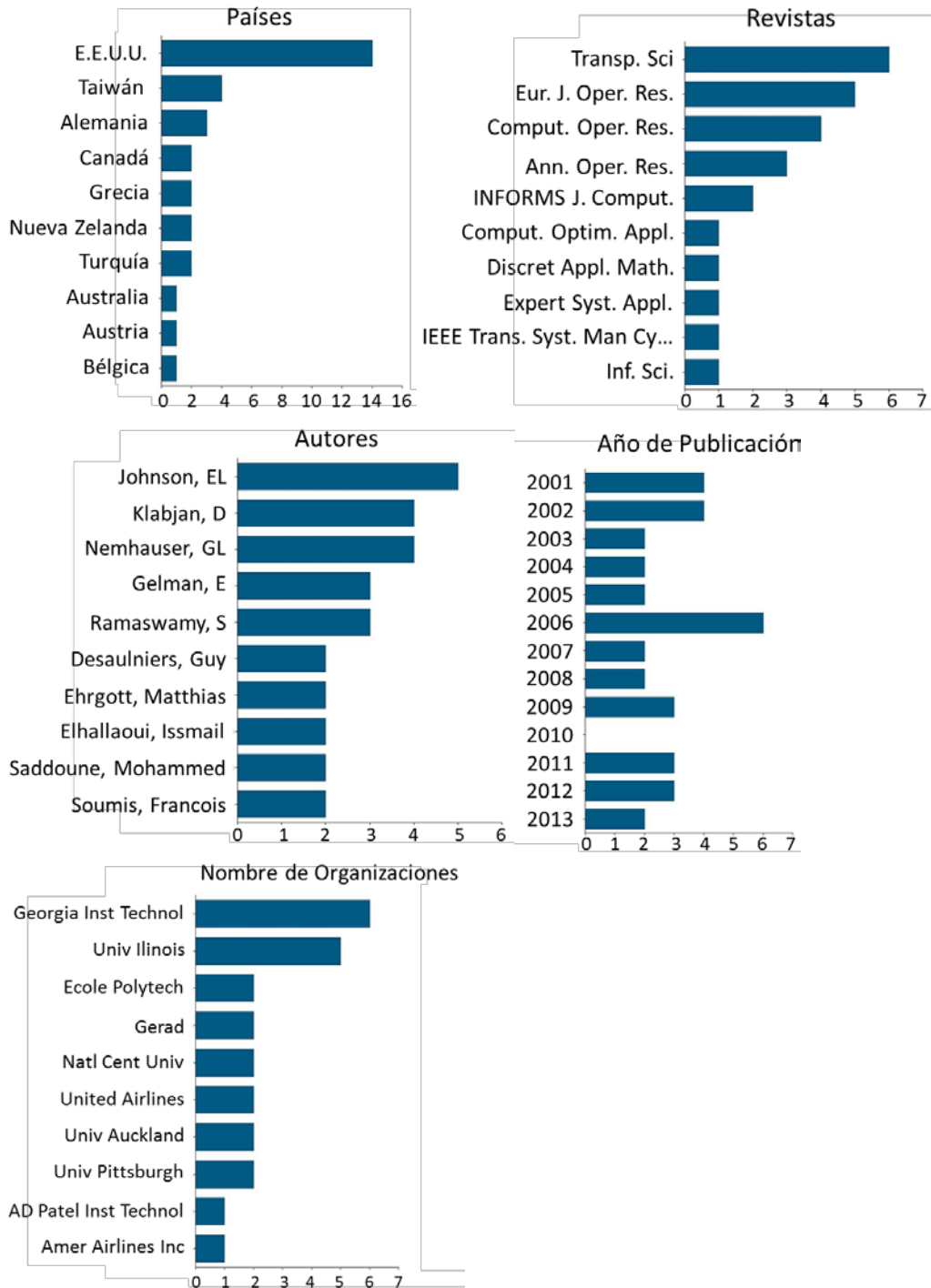
Conjunto	Resultados	Historial
1	35	Tema: ("AIRLINE CREW SCHEDULING") Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
2	85	Tema: ("air cargo" AND "model*")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
3	1	Tema: ("Optimization Airline ")Índices=SCI- EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
4	2	Tema: ("Optimization" AND "baggage handling")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
5	1	Tema: ("Optimiz*" AND "turn around" AND "airport")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
6	4	Tema: ("Airport logistics")Índices=SCI- EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
7	390	Tema: ("Algorithm" AND " aircraft" AND "optimization")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
8	72	Tema: ("Algorithm" AND " airline" AND "optimization")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
9	125	Tema: ("Airline" AND "optimization" AND "model")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
10	32	Tema: ("Air traffic" AND "program*" AND "model" AND "optimiz*")Índices=SCI- EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
11	10	Tema: ("Air cargo" AND "model" AND "optimiz*")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
12	70	Tema: ("Scheduling" AND "method*" AND "airline")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014

<b>13</b>	2	Tema: ("Scheduling" AND "method*" AND "algorithm" AND "pilots")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
<b>14</b>	8	Tema: ("Heuristic*" AND "method*" AND "algorithm" AND "airport")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
<b>15</b>	15	Tema: ("Supply chain" AND "airport")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
<b>16</b>	2	Tema: ("Baggage handling"AND "heuristic*")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
<b>17</b>	39	Tema: ("Airport" AND "logistic*" AND "Model*")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014
<b>18</b>	104	Tema: (" Air*" AND "logistic*" AND "algorithm*")Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI Período de tiempo=2001-2014

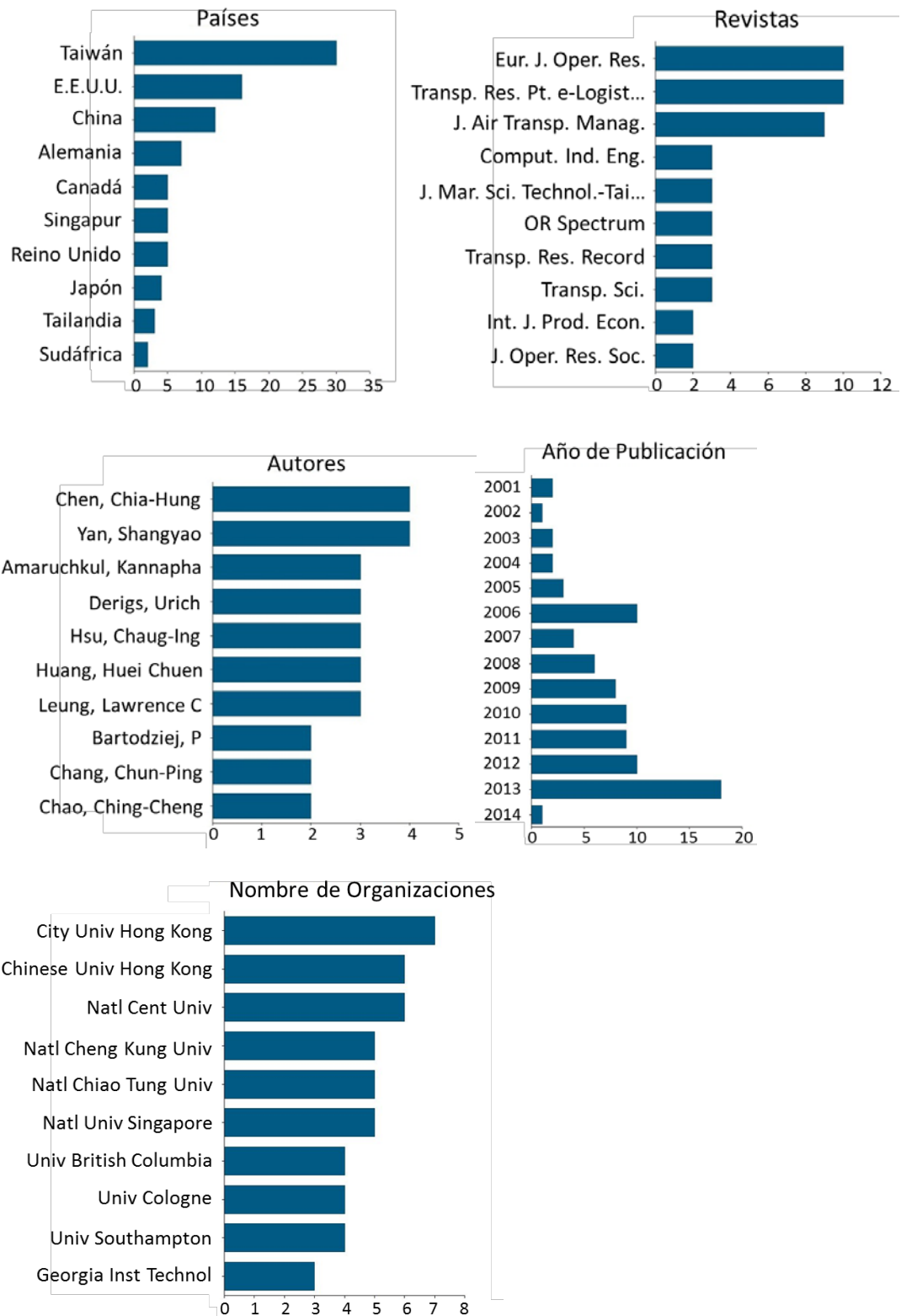
## ANEXO C

### ACTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE PUBLICACIONES

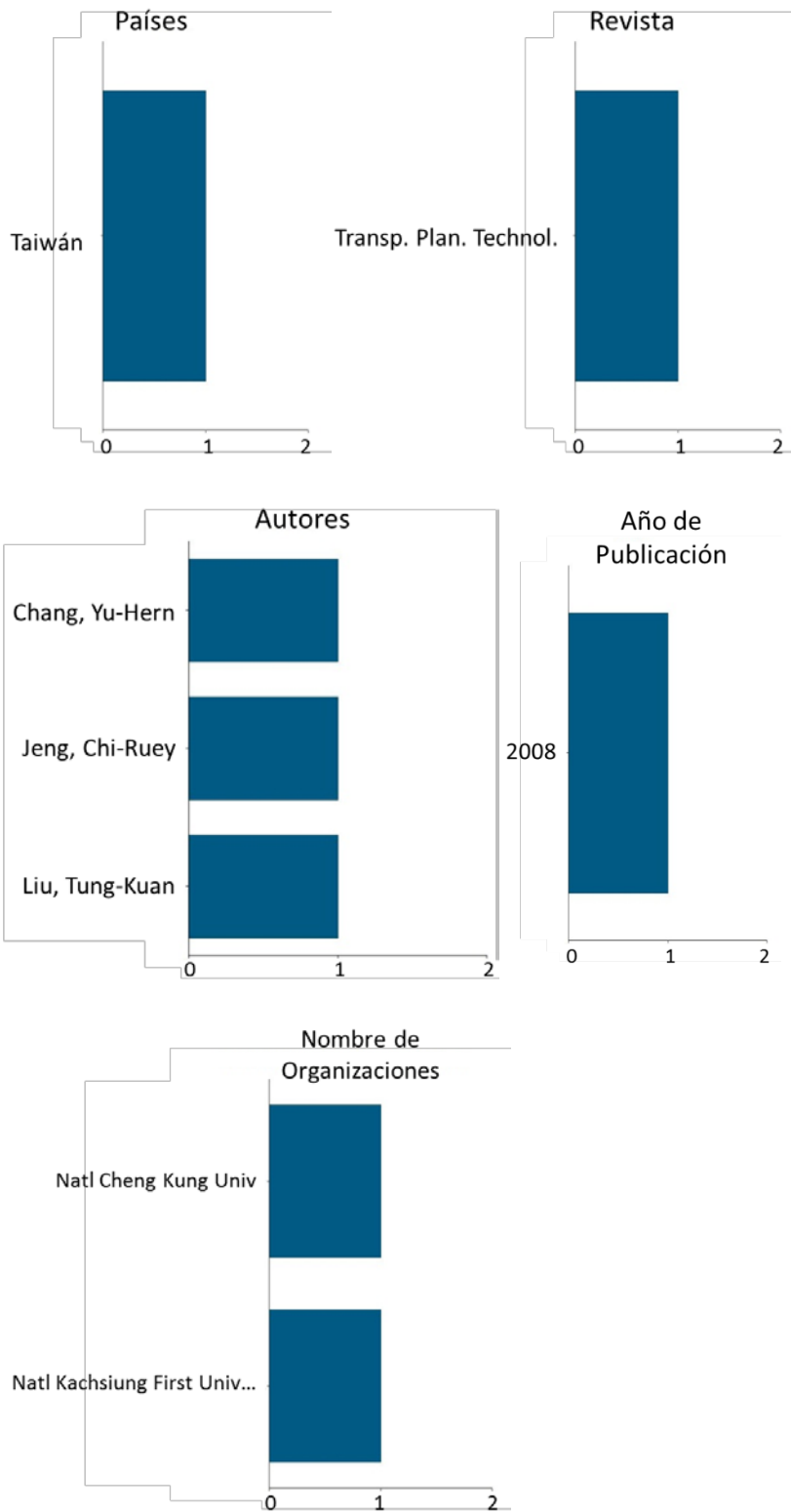
TEMA DE BÚSQUEDA: "Airline crew scheduling"



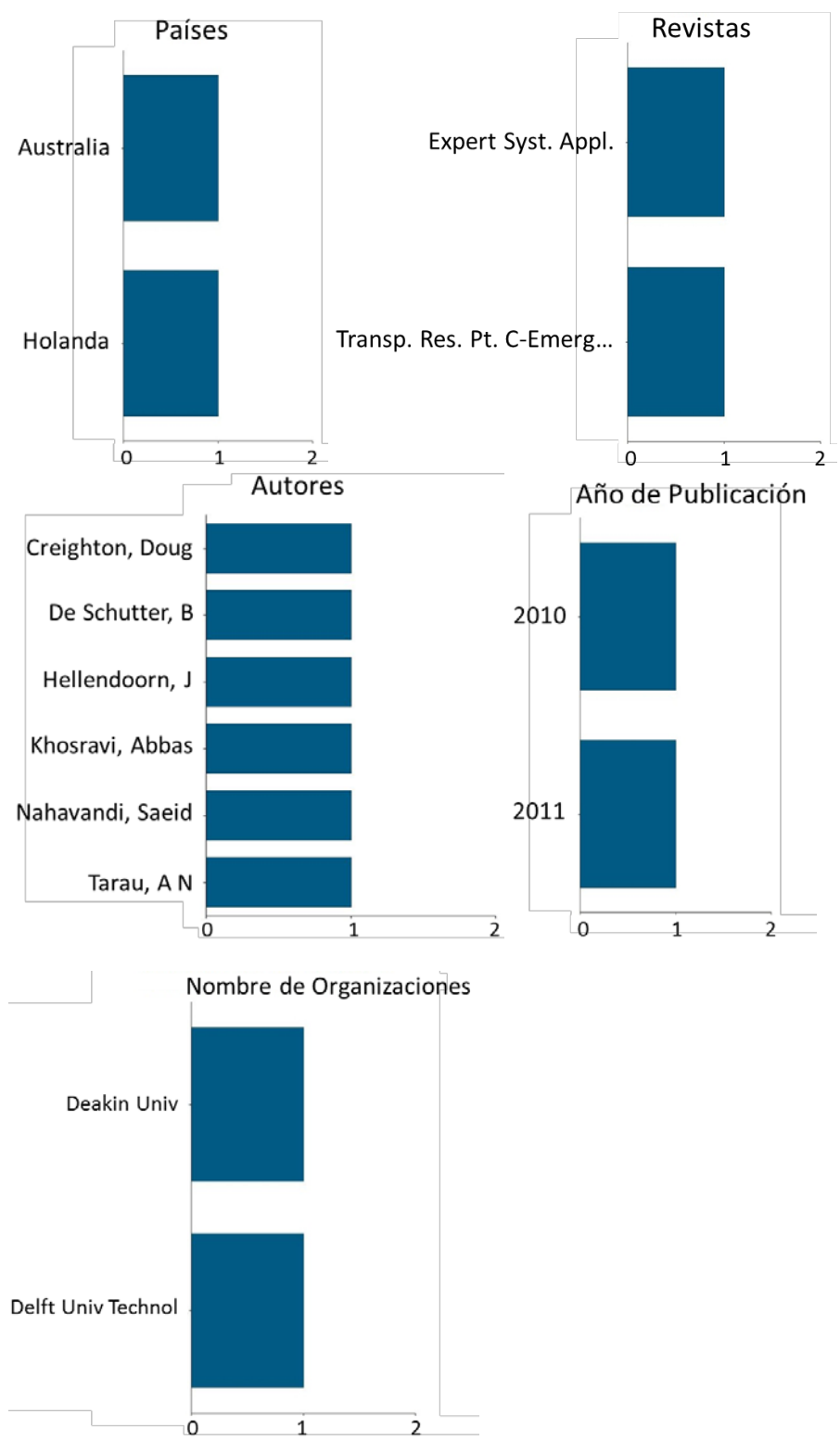
## TEMA DE BÚSQUEDA: "Air cargo" y "model"



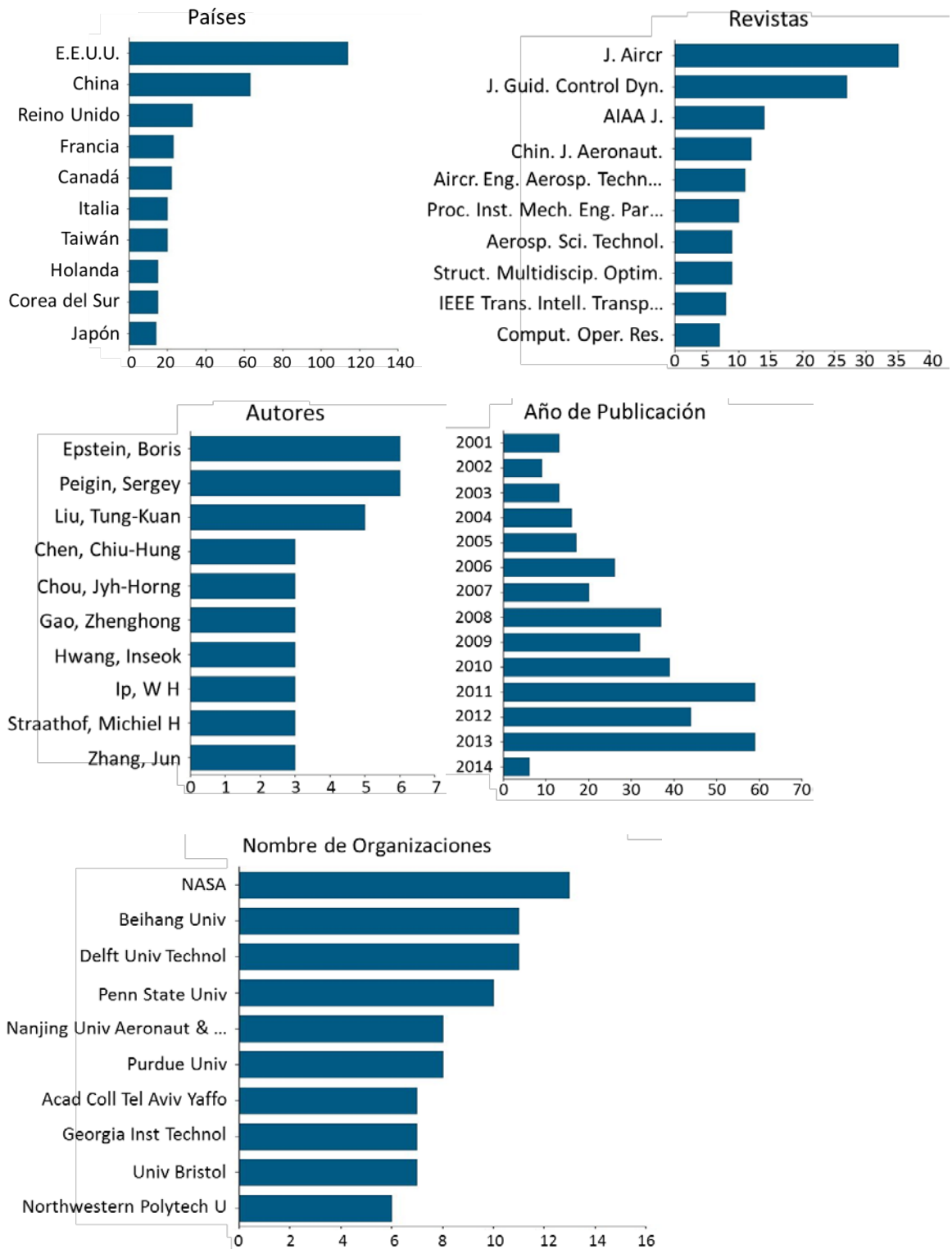
# TEMA DE BÚSQUEDA: "Optimization airline"



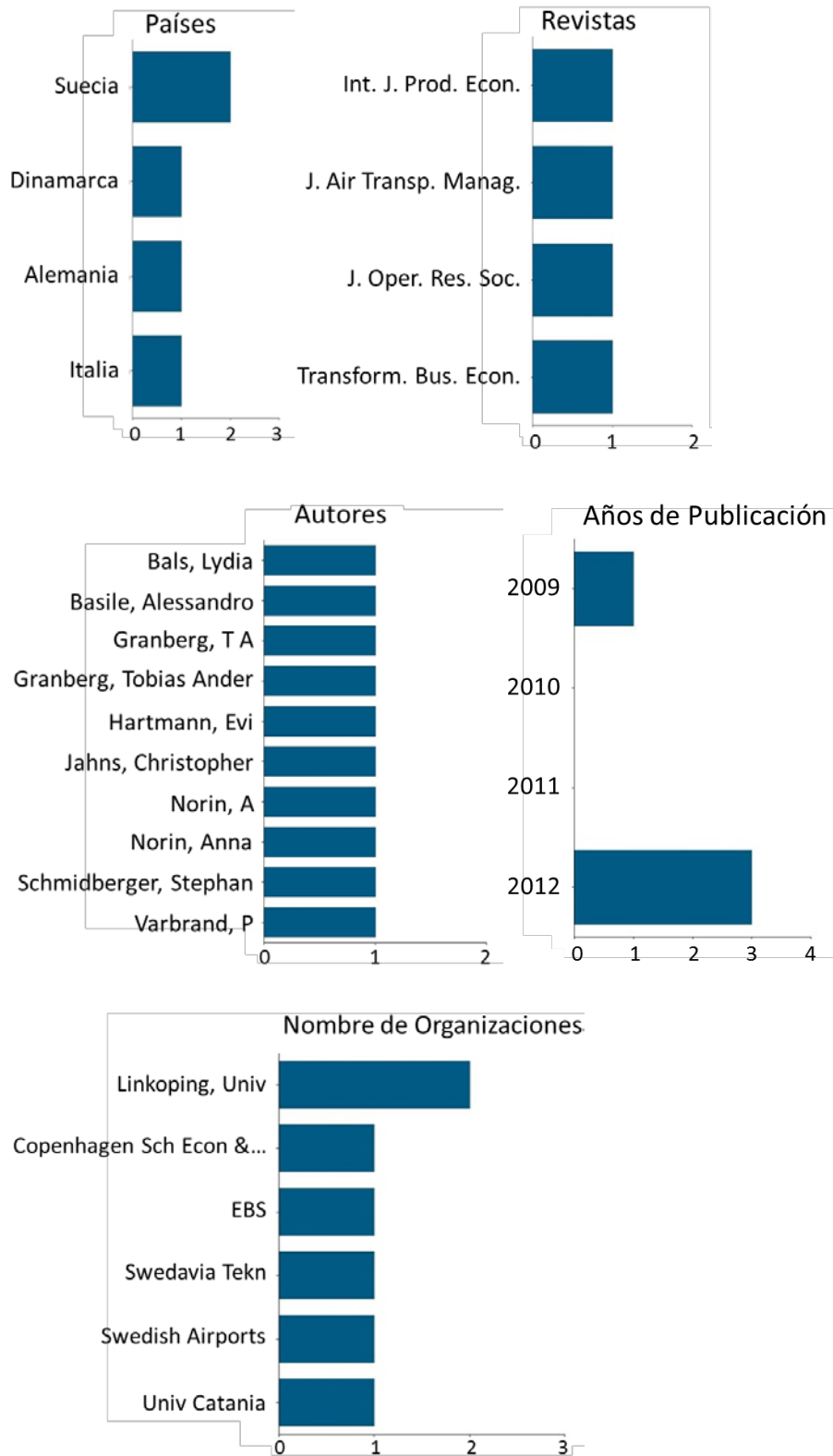
# TEMA DE BÚSQUEDA: "Optimization" y "baggage handling"



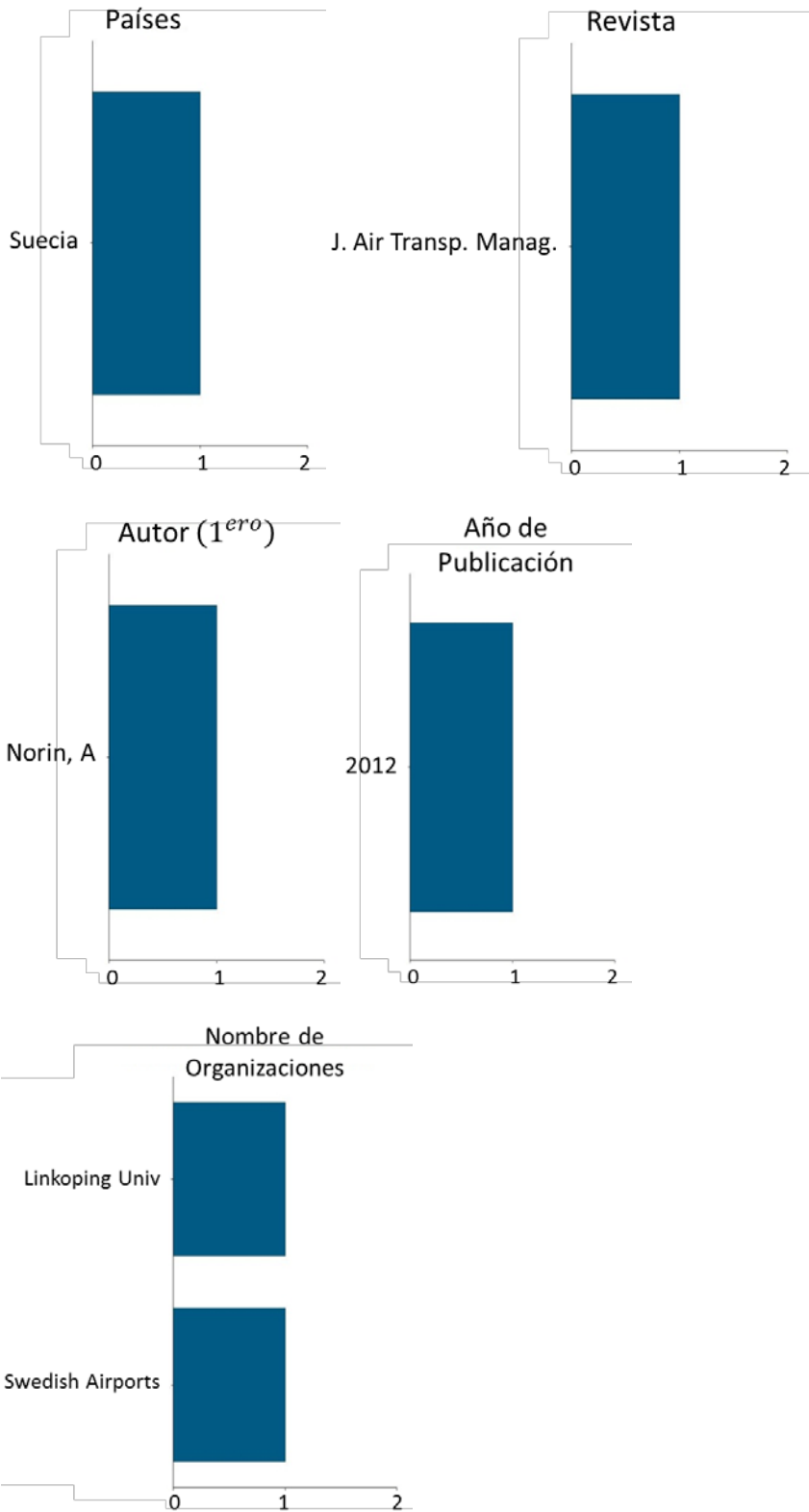
## TEMA DE BÚSQUEDA: "Algorithm" y "airline" y "optimization"



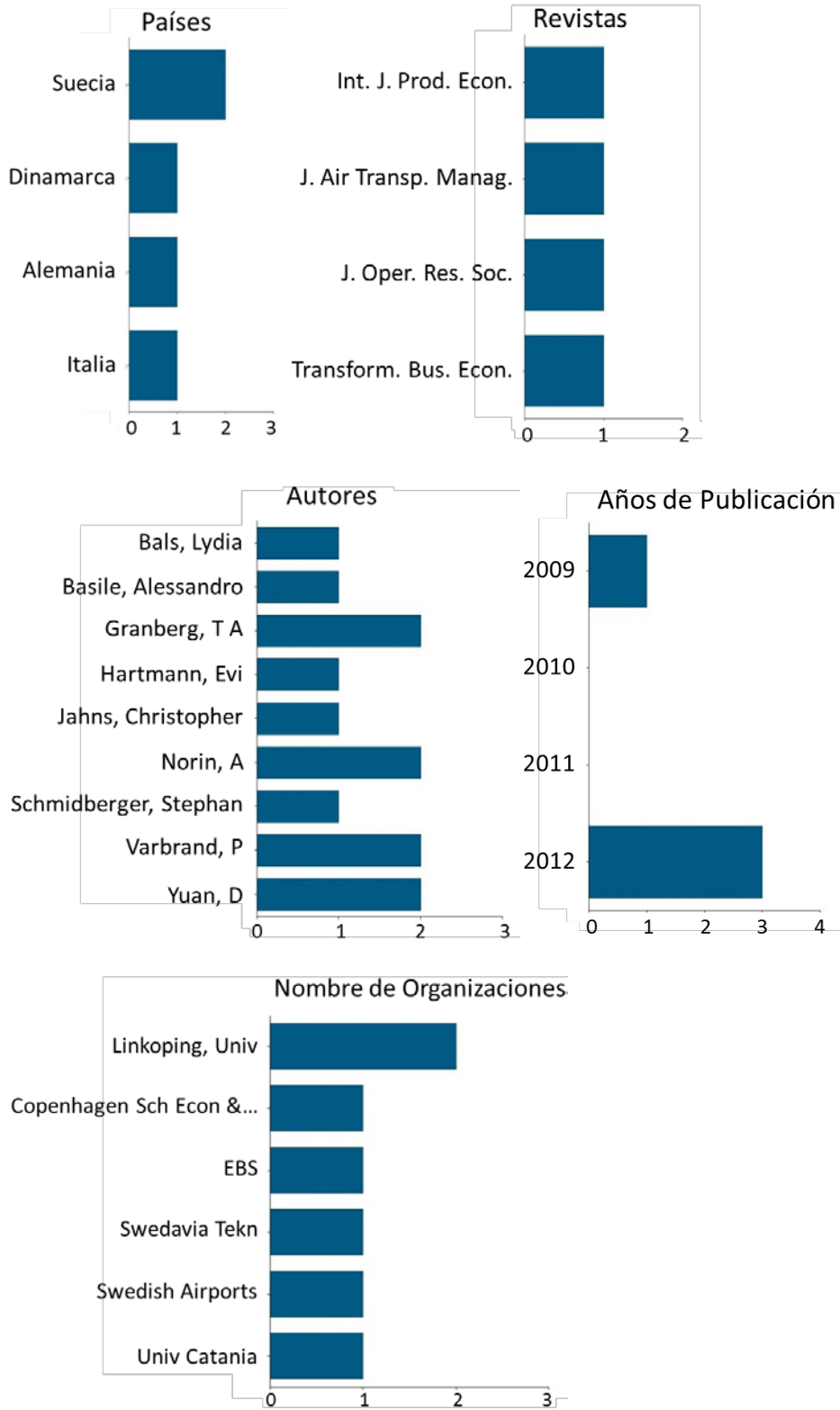
TEMA DE BÚSQUEDA: "Algorithm" y "aircraft" y "optimization"



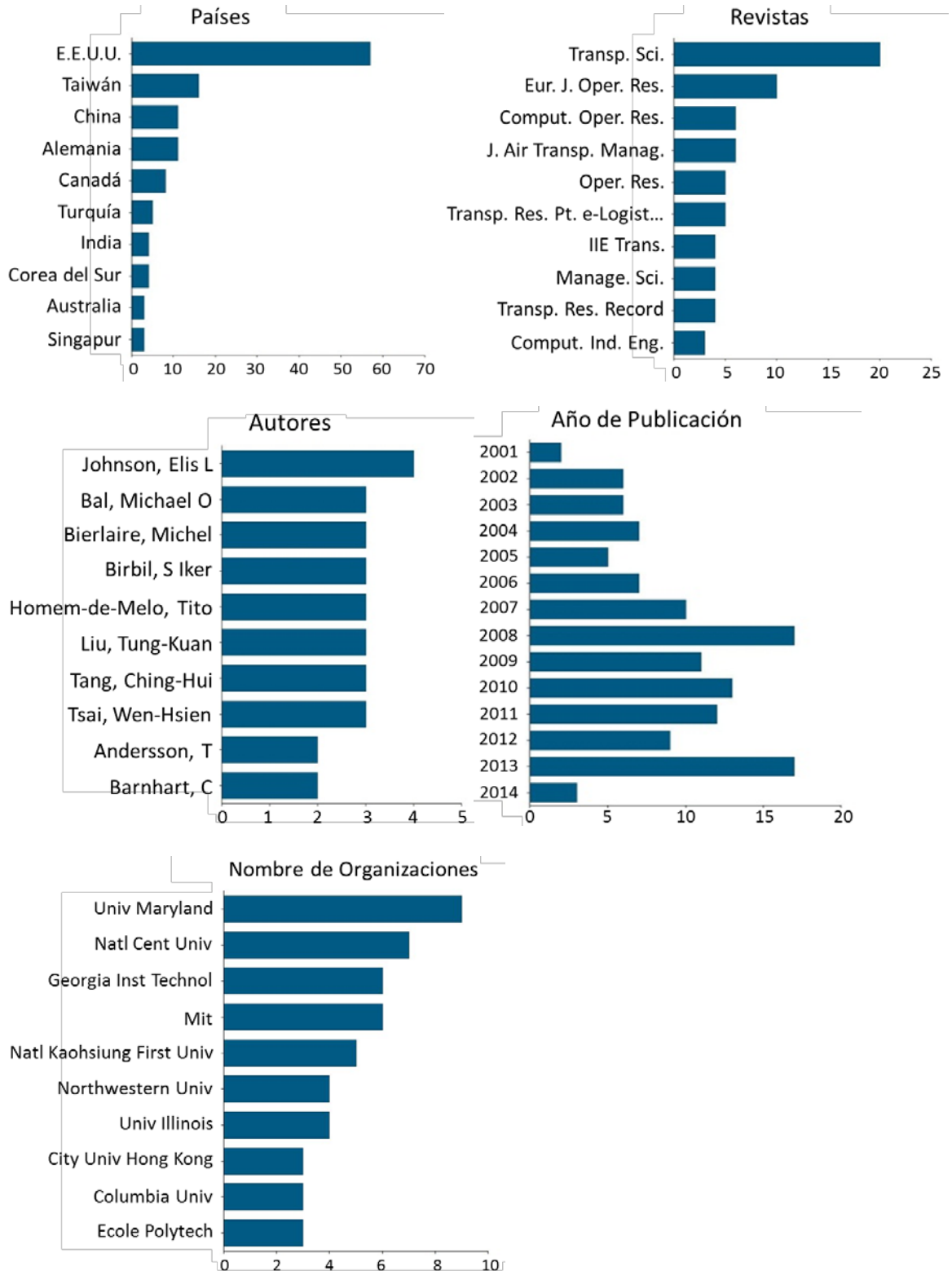
TEMA DE BÚSQUEDA: "Optimiz"y "turn around" y"airport"



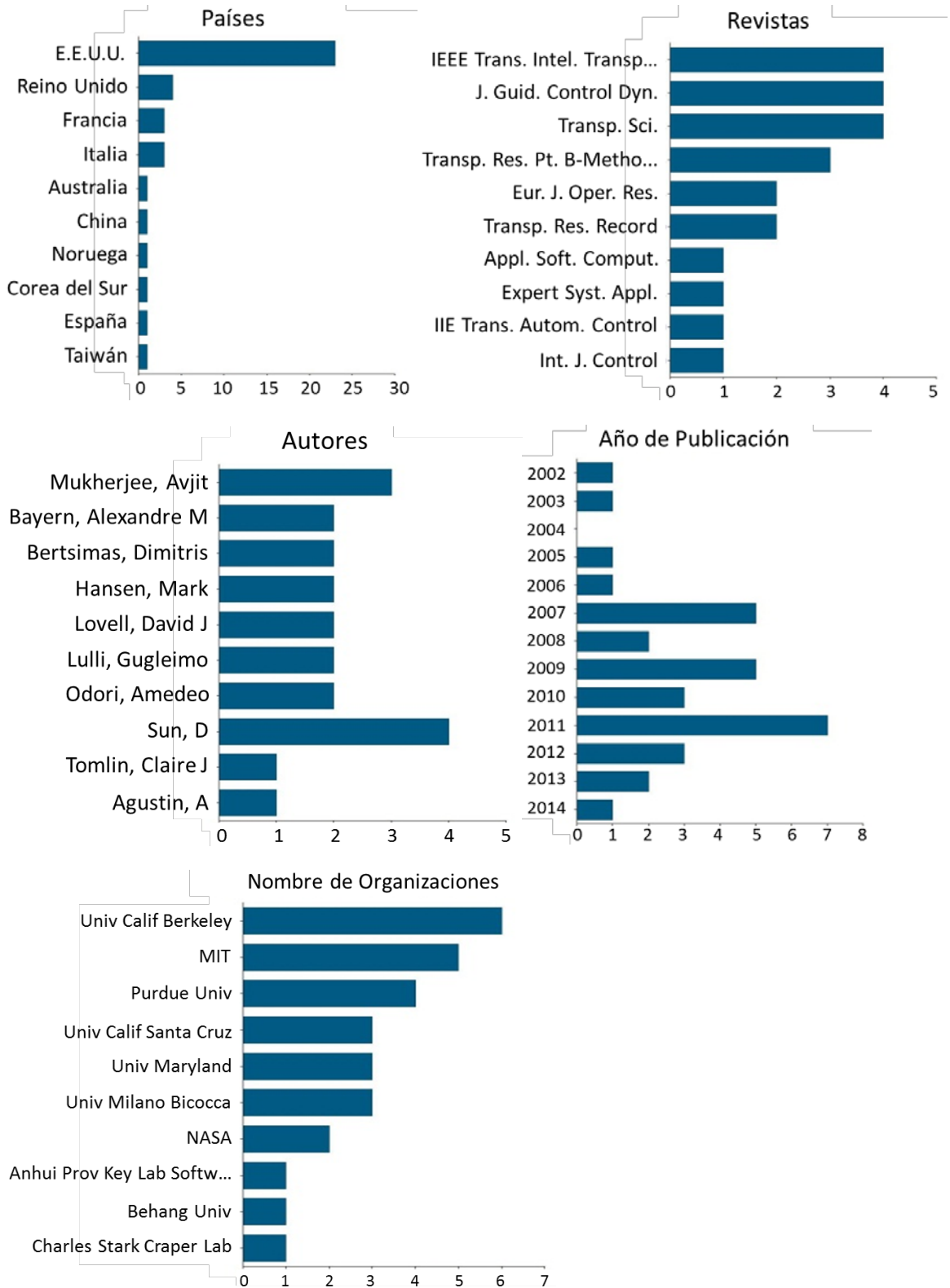
## TEMA DE BÚSQUEDA: "Airport logistics"



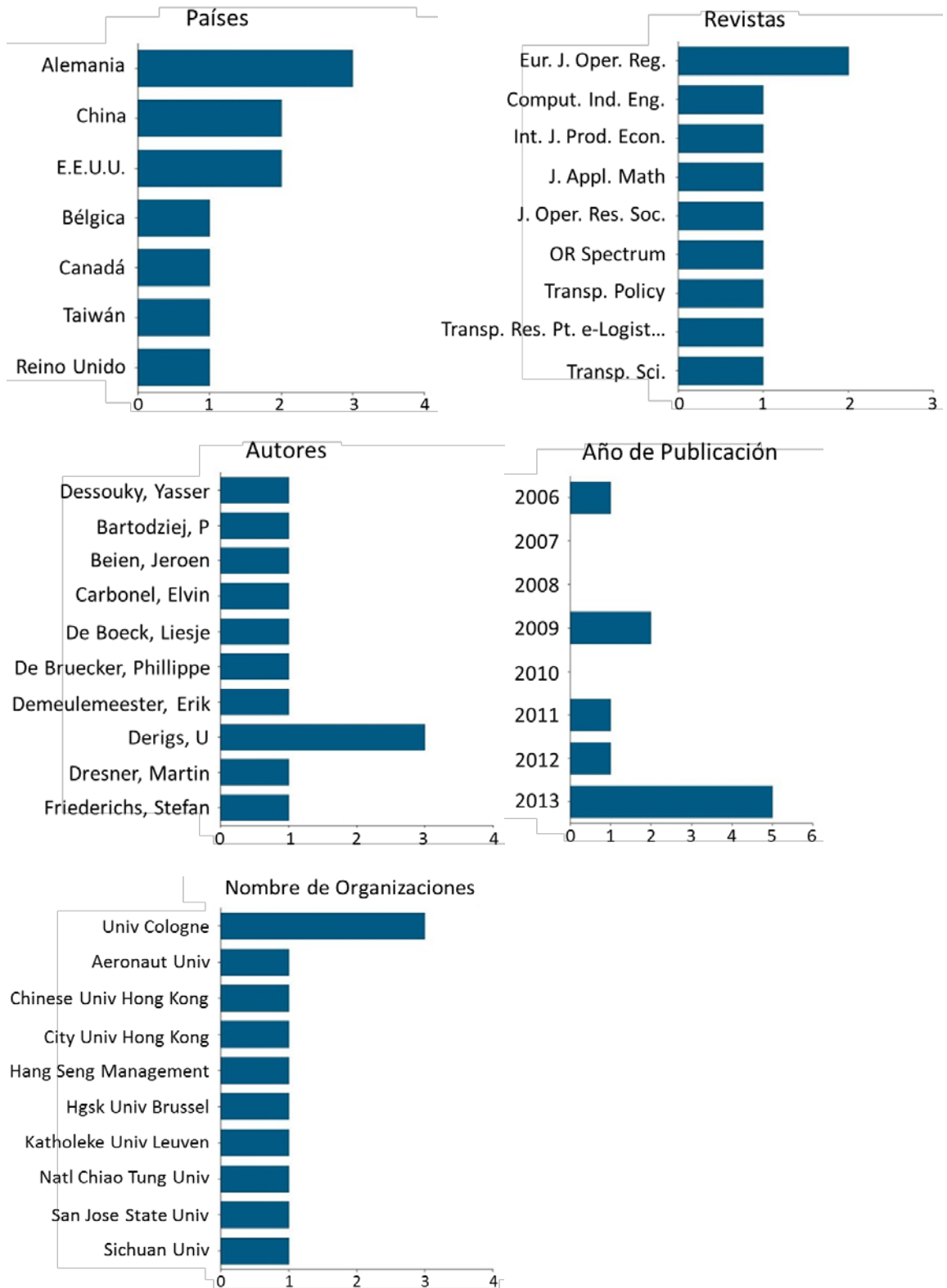
TEMA DE BÚSQUEDA: "Airline" y "optimization" y "model"



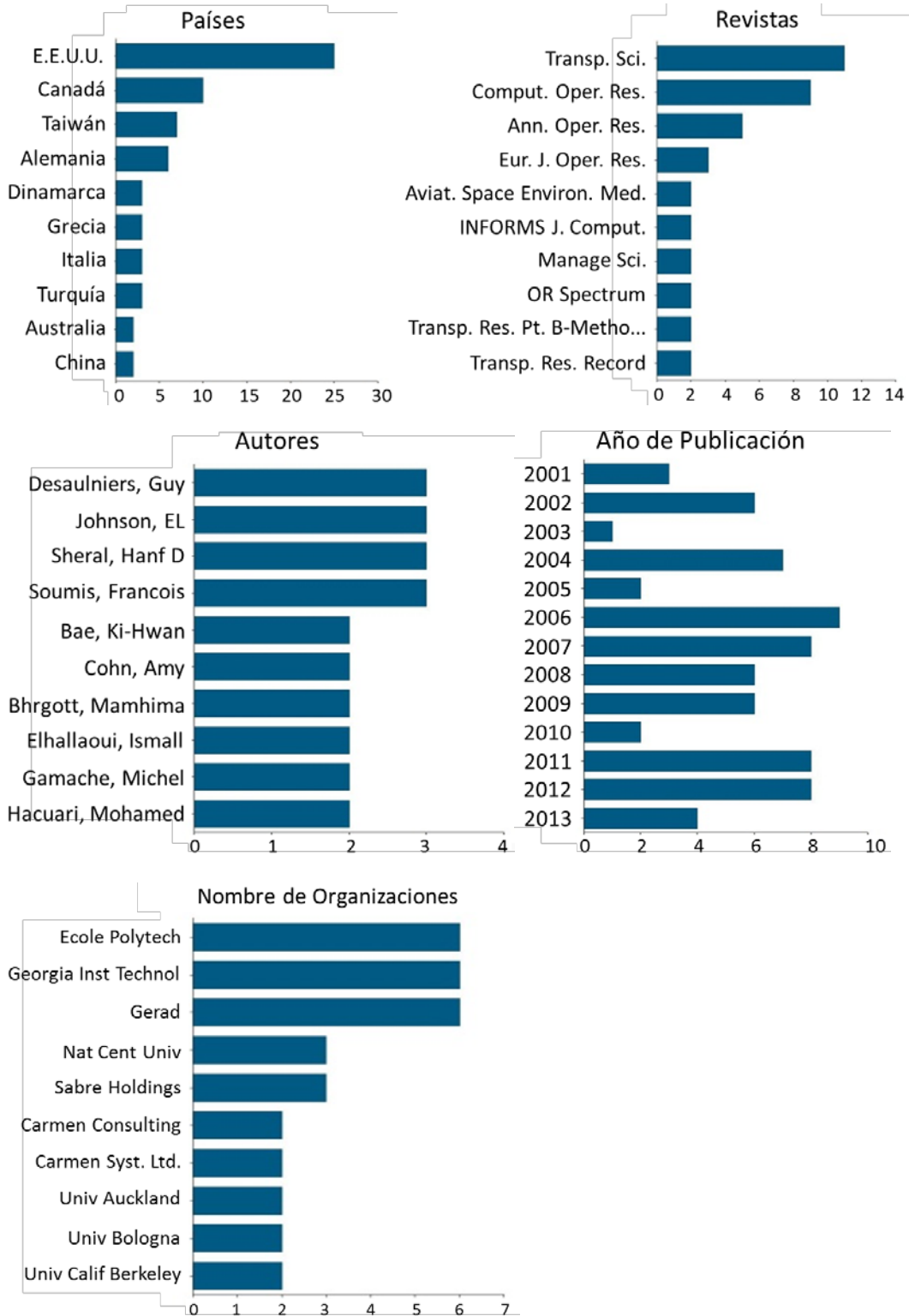
TEMA DE BÚSQUEDA: “Air traffic” y “program” y “model” y “optimiz”



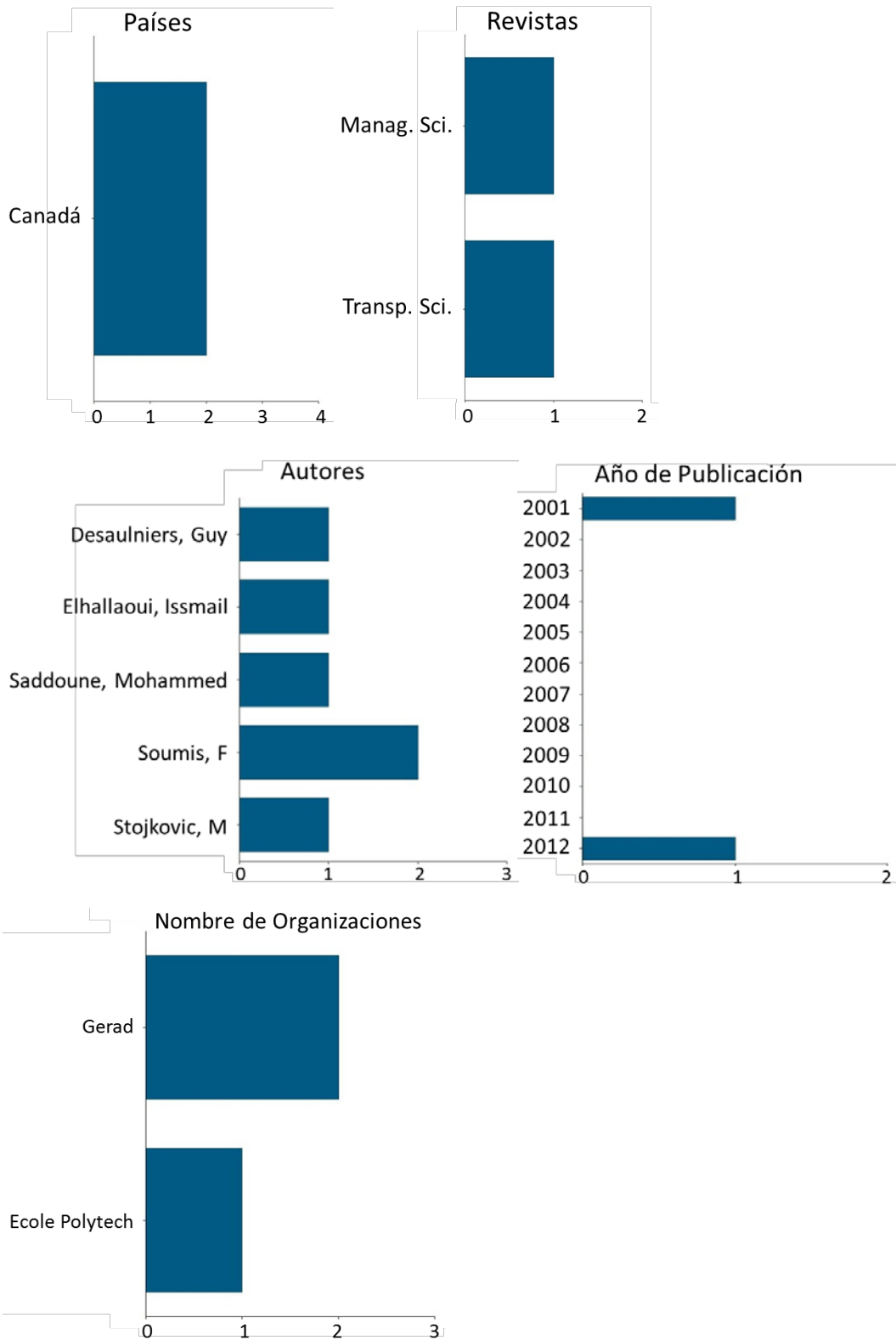
TEMA DE BÚSQUEDA: “Air cargo” y “model” y “optimiz”



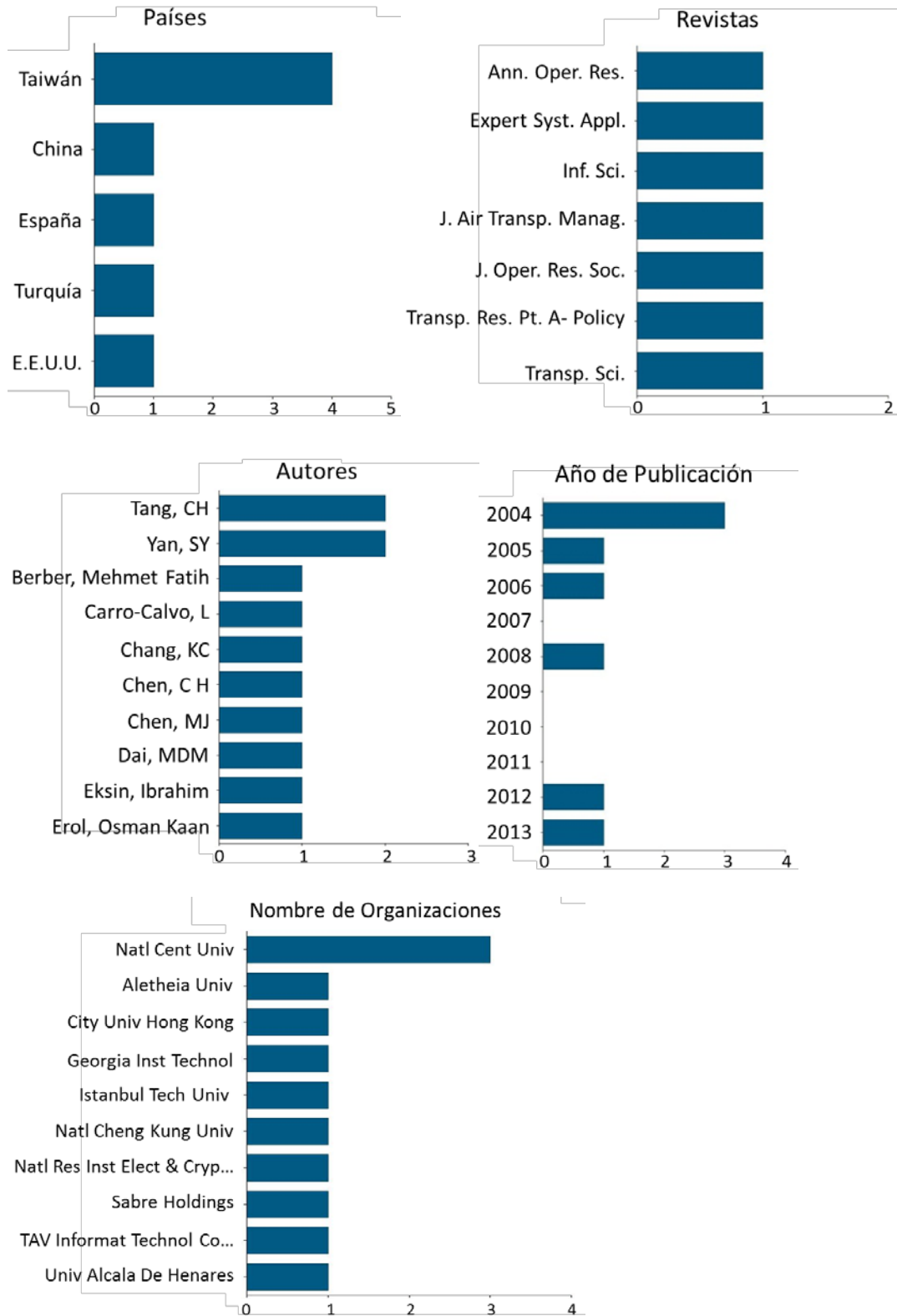
TEMA DE BÚSQUEDA: "Scheduling" y "method" y "airline"



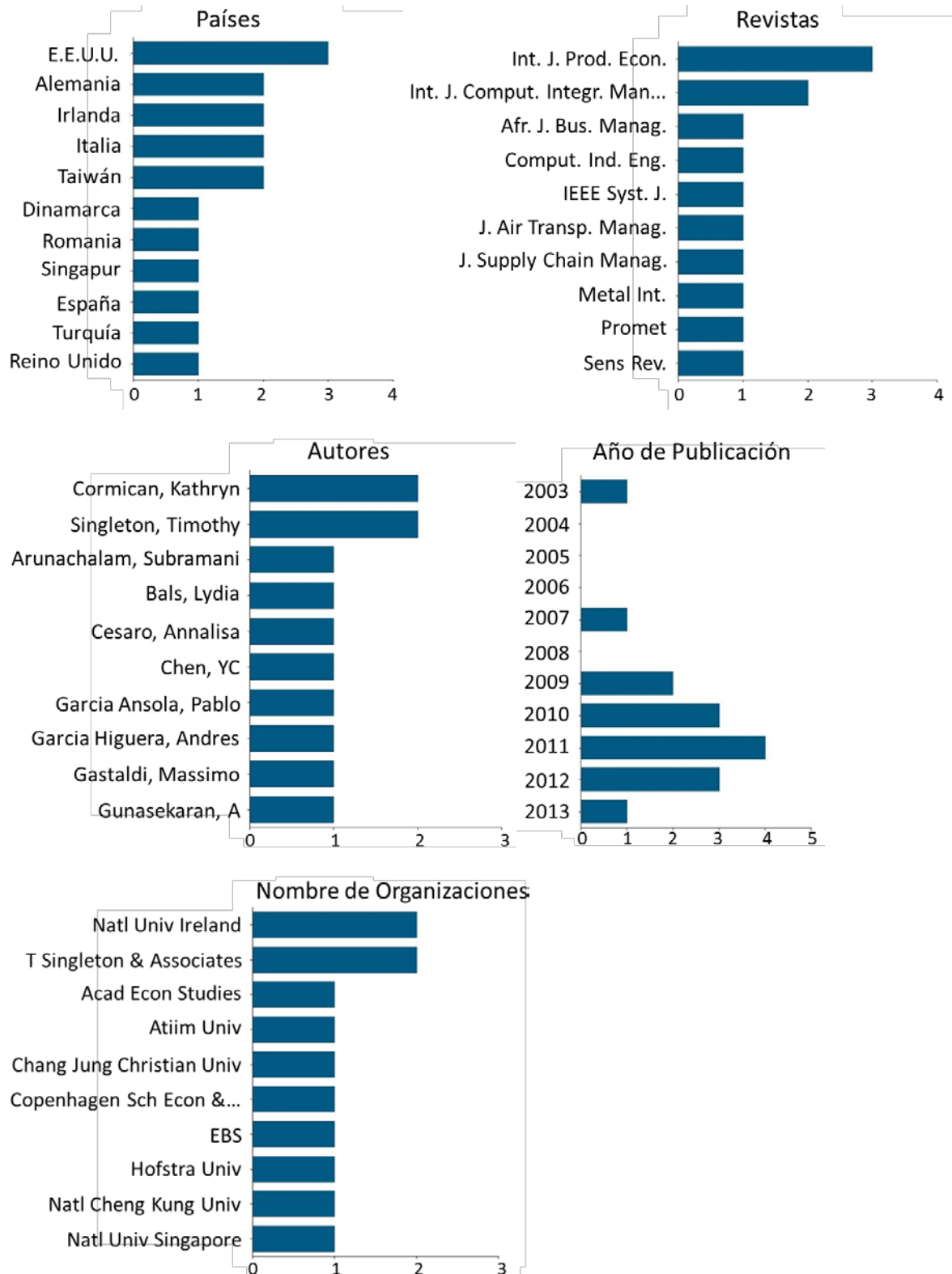
TEMA DE BÚSQUEDA: “Scheduling” y “method” y “algorithm” y “pilots”



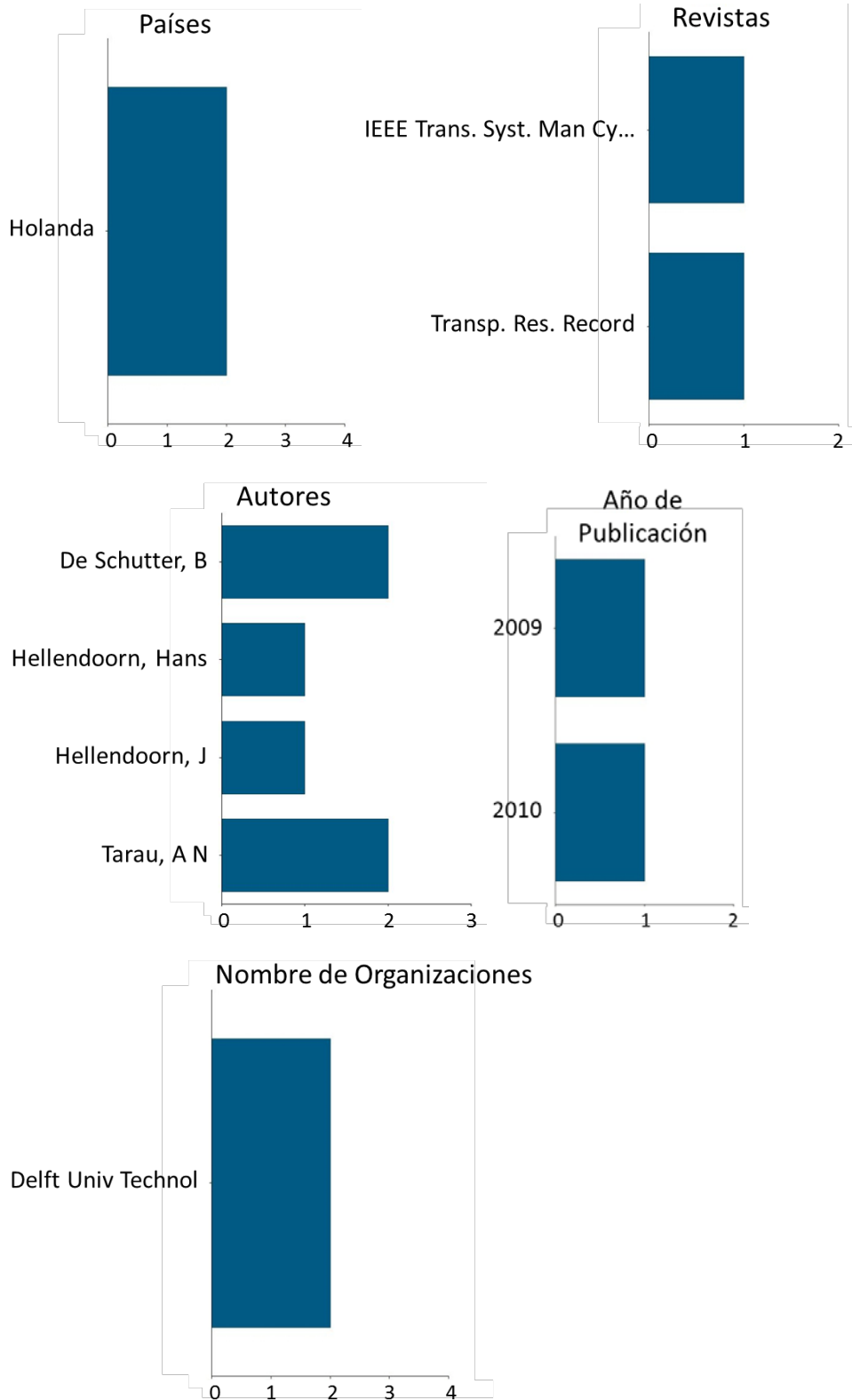
TEMA DE BÚSQUEDA: “Heuristic” y “method” y “algorithm” y “airport”



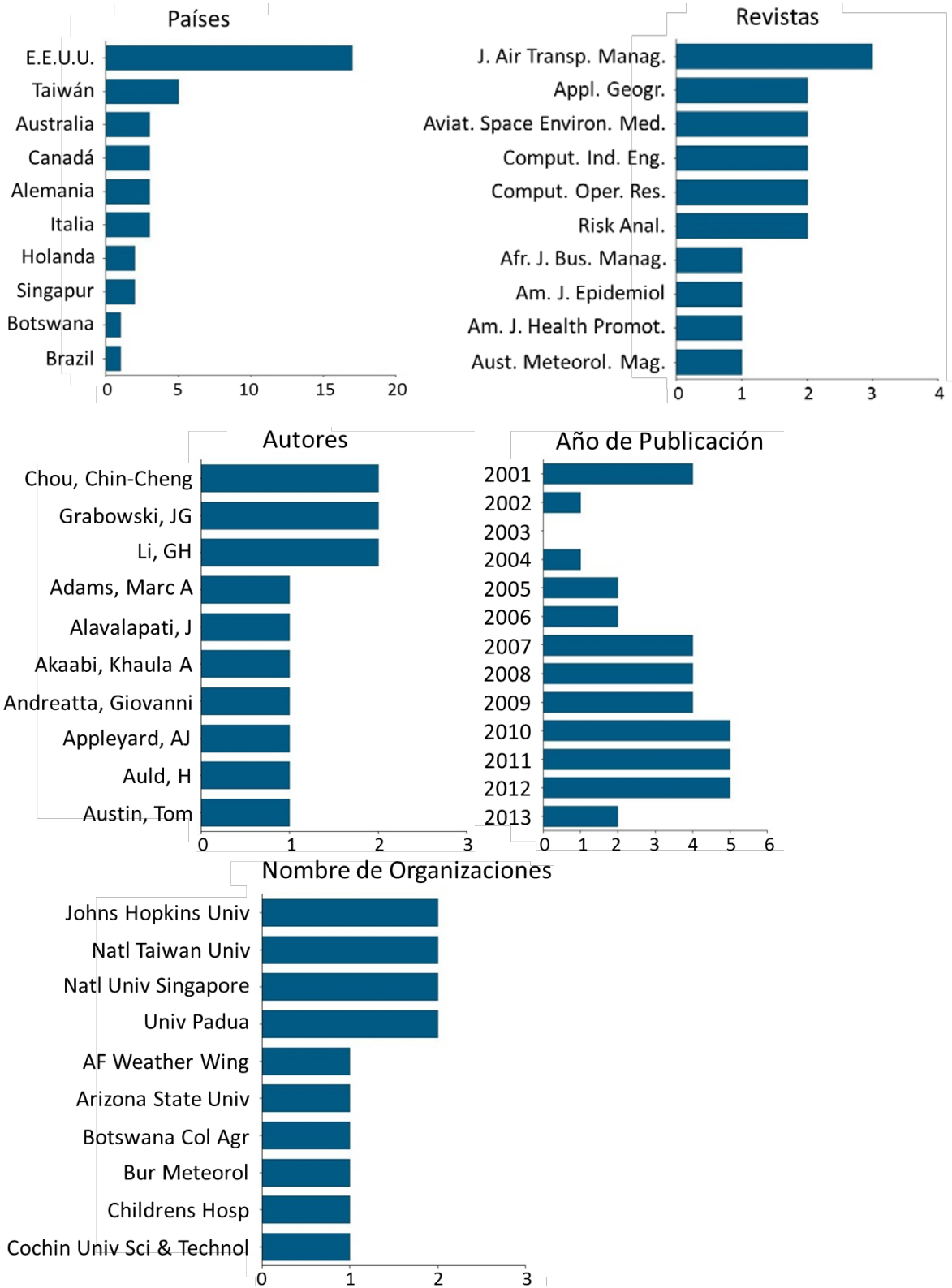
## TEMA DE BÚSQUEDA: "Supply chain" y "airport"



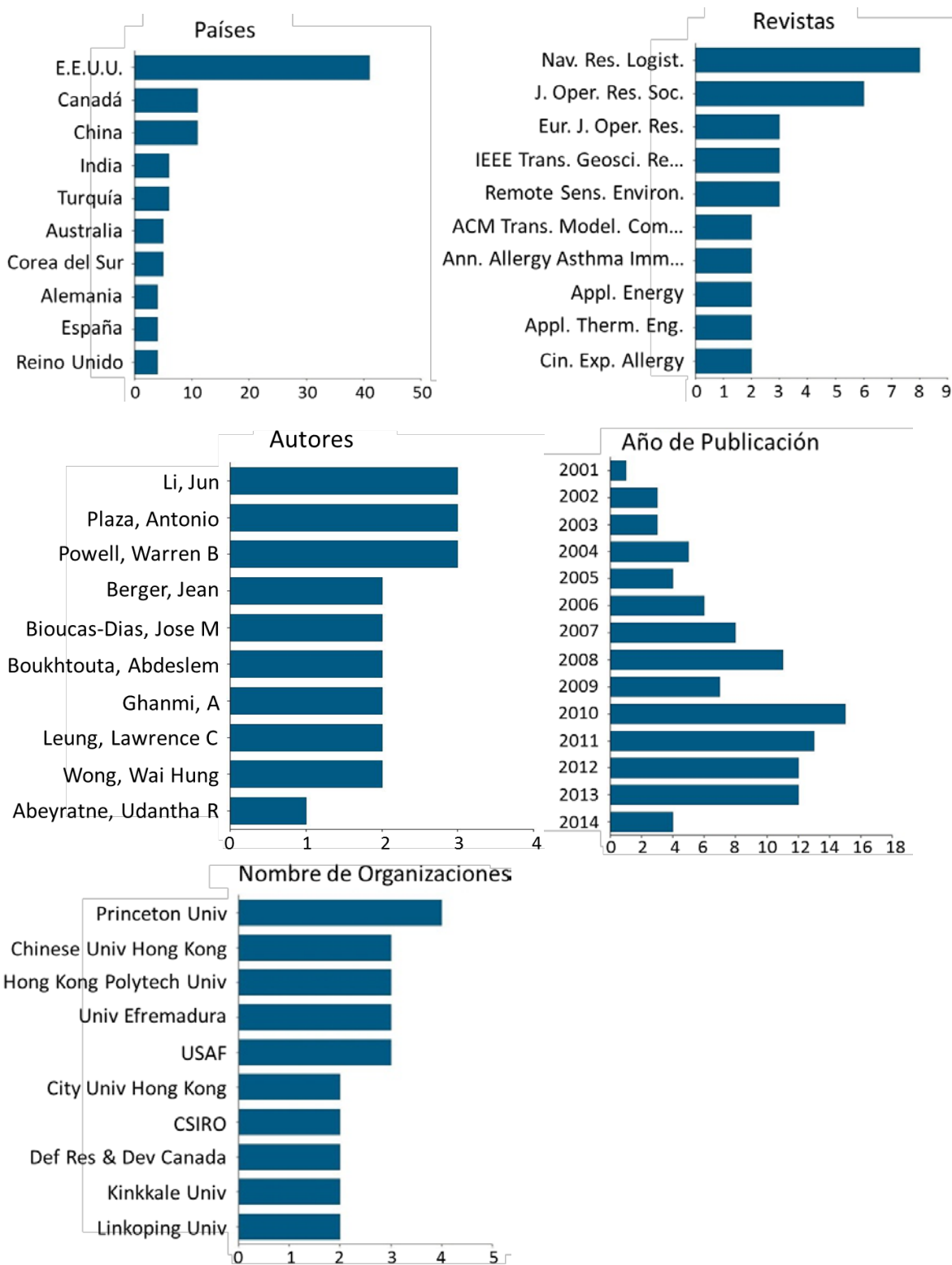
### TEMA DE BÚSQUEDA: "Baggage handling" y "heuristic"



TEMA DE BÚSQUEDA: "Airport" y "logistic" y "Model"



## TEMA DE BÚSQUEDA: "Air" y "logistic" y "algorithm"



## ANEXO D

### MATRICES DE CORRELACIÓN

#### MATRIZ DE CORRELACIÓN CATEGORIAS vs PAÍSES

CATEGORIAS	USA	CHINA	TAIWAN	CANADA	ALEMANIA
GEORGIA INST TECHNOL	34	-	-	-	-
NATL CENT UNIV	1	-	27	-	-
UNIV. MARYLAND	23	1	1	-	-
NATL KAOSIUNG FIRST UNIV SCI & TECHNOL	-	-	22	-	-
GERAD	4	-	-	17	-
MIT	17	-	-	-	-
NATL. CHENG KUNG UNIV	-	-	17	-	-
NATL. UNIV SINGAPURE	3	1	-	-	-
UNIV ILLIONS	17	-	-	-	-
DELF UNIV TECHNOL	2	-	-	-	-
ECOLE POLYTECH	1	-	-	15	-
NASA	15	-	-	-	-
PURDUE UNIV	15	2	-	-	-
UNIV CALIF BERKELEY	15	1	2	-	-
CITY UNIV HONG KONG	-	14	6	6	11
<b>TOTAL</b>	<b>148</b>	<b>19</b>	<b>75</b>	<b>38</b>	<b>11</b>

MATRIZ DE REVISTAS vs PAÍSES LÍDERES

Revistas	ESTADOS UNIDOS	CHINA	TAIWAN	CANADA	ALEMANIA	INGLATERRA	ITALIA	FRANCIA	COREA DEL SUR	PAISES BAJOS
TRANSP. SCI	44	2	-	6	3	-	1	-	-	-
EUR. J. OPER. RES.	16	4	4	5	5	-	1	-	2	1
JOURNAL AIRCRAFT	8	3	2	4	1	3	1	1	1	3
J. GUID. CONTROL DYN	18	-	-	-	-	5	1	1	2	-
COMPUT. OPER. RES.	7	2	2	7	-	4	1	-	-	6
J. AIR TRANSPORT MANAGEMENT	7	-	9	2	10	-	1	-	-	-
J. OPER. RES. SOC	2	1	5	4	-	3	-	-	9	-
TRANSP. RES. PT. E-LOGIST. TRANS. REV	9	2	3	2	-	-	-	2	-	-
TRANS. RES. RECORD	9	-	2	1	10	2	-	4	-	-
ANN. OPER. RES.	6	10	1	20	10	1	5	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>207</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>51</b>	<b>39</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>10</b>

MATRIZ DE CORRELACIÓN CATEGORÍAS vs AÑOS

CATEGORIAS	2008	2009	2010	2011	2012	2013
GEORGIA INST TECHNOL	3	2	1	3	3	1
NATL CENT UNIV	10	-	2	2	1	1
UNIV. MARYLAND	3	1	1	4	1	4
NATL KAOSIUNG FIRST UNIV SCI & TECHNOL	8	-	5	-	-	8
GERAD	-	-	-	2	3	-
MIT	4	-	1	3	-	1
NATL. CHENG KUNG UNIV	8	-	-	2	2	-
NATL. UNIV SINGAPURE	1	-	4	2	5	1
UNIV ILLIONS	-	-	4	2	5	1
DELF UNIV TECHNOL	1	3	1	2	9	7
<b>TOTAL</b>	<b>38</b>	<b>6</b>	<b>19</b>	<b>22</b>	<b>29</b>	<b>24</b>

MATRIZ DE CORRELACIÓN PALABRAS CLAVE Vs AÑOS

<b>PALABRA CLAVE</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>
<b>OPTIMIZATION</b>	10	18	32	46	67	38
<b>LOGISTIC</b>	<b>45</b>	<b>41</b>	<b>39</b>	<b>29</b>	<b>24</b>	<b>15</b>
<b>CREW SHEDULING</b>	4	11	54	40	32	19
<b>ALGORITHMS</b>	30	25	20	41	49	20
<b>AIRLINE</b>	45	24	22	25	25	16
<b>AIRCRAFT</b>	21	24	29	22	17	12
<b>SIMULATION</b>	45	15	21	29	30	23
<b>AIR CARGO</b>	12	26	19	15	31	4
<b>FLOW MANAGEMENT</b>	35	15	22	16	15	7
<b>MODELS AND SIMULATIONS</b>	18	8	17	19	14	7
<b>TOTAL</b>	<b>265</b>	<b>261</b>	<b>349</b>	<b>356</b>	<b>372</b>	<b>213</b>

## ANEXO E

### PALABRAS CLAVE ASOCIADAS A LAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

OPERATION RESEARCH AND MANAGEMENT SCIENCE		
<b>Operation research</b>	Investigation	Problems and solutions
<b>Problems</b>	Routing problems	Route Planning
<b>Optimization</b>	Models and simulation	Algorithm
<b>Programming</b>	Optimization	Liner programming
<b>Comb. Optimization</b>	Allocations of task	Localization
<b>Methods</b>	Exact Methods	Optimum solutions
<b>Transport</b>	Route	Programming
<b>Decision Making</b>	Deterministic Systems	Uncertainty
<b>Science</b>	Knowledge	Theorem
<b>Security management system</b>		
<b>Safety management system</b>	Cabin safety	Health and safety

ENGINEERING AND LOGISTICS SOFTWARE		
<b>Network synchronization</b>	Transmission systems	Wireless systems
<b>User Interfaces</b>	Software	Internet Languages
<b>Logistics</b>	Organization methods	Planning and production
<b>Simultaneous localization</b>	Mapping	
<b>Operations and infrastructure</b>	Engineering	
<b>Industry data model</b>		
<b>One stop Security</b>		

TRANSPORTATION AIR		
<b>Air control</b>	Air controllers	Standards, safety and efficiency
<b>Aircraft</b>	Flight Programming	Time flight
<b>Transport</b>	Cargo	Passengers
<b>Aircrew</b>	Crew staffing an aircraft	Scheduling
<b>Air services</b>	Commercial Aviation	General Aviation
<b>Airport</b>	Taxiway	Airstrip
<b>Stowage Factor</b>	Burden	Light load
<b>Cargo elements</b>	Tie down equipment	Unit load devices, ULD
<b>Cargo</b>	Codes- Airline and airport, TACT, DGR, HASMAT	Cargo Tracker
<b>E- cargo</b>		
<b>Security</b>	Cargo security	Cargo operations
<b>Airwaybill</b>		
<b>Customs and trade facilitation</b>		
<b>Environment</b>	Carbon Offset program	

BUSINESS & ECONOMICS		
<b>Expenses and income</b>	Increase flights	Aircraft purchase
<b>Gain</b>	net profit	New Customers
<b>Economic Structure</b>	pricing system	Profitability of the airline
<b>Economics of Airports</b>	Supply and demand	State intervention
<b>Economy sector</b>	Growth restrictions	
<b>Feature of the market</b>		
<b>New alliances</b>	Business Associate	
<b>Intelligence and Statistics</b>	Business Intelligence	Global Aviation Data Management (GADM)
<b>Travel Industry</b>	ID card, travel professionals, Industry partners	Agent Experience, Agenthome
<b>Customers</b>		
<b>Market development</b>	Market and industry issues	Fuel price monitor
<b>Simplifying the business</b>		

INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION		
<b>Instruments pilot</b>	Speed and spin	Altimeter
<b>Motor Control</b>	Power indicator	Engine Operation
<b>Navigational instruments</b>	ADF, DME, ILS, CDI, Autopilot	Flight management system

AIRCRAFT CONTROL		
<b>Operational needs</b>	Plans flight	DMAN,DCL, Time information
<b>Operational Requirements</b>	System Back up	Control and monitoring of airfield lights
<b>System Overview</b>	Modes	HMI, FVE, Funtion, A-SMGCS
<b>Requirements</b>	Technical and functional	Rules
<b>Architecture</b>		
<b>Communication &amp; navigation</b>	PCM and RDSI Technology	
<b>Automation and Simulation</b>	FDP, SDP, RDCU, DLS, SDD/FDD, DBM, SIM	
<b>Monitoring</b>	Surface Radar, primary radar and secondary radar.	Multilateration
<b>Data Integration</b>	Flight information, airport and airline information	arrivals, departures, delays, crew

AIRLINE CREW SCHEDULING		
<b>Complex</b>	Software	
<b>Parts</b>	People and their qualifications and abilities, aircraft and vehicles	Locations and the time and distance between each location
<b>Disruptions</b>	Unplanned disruptions	Delays
<b>Crew Scheduling</b>	Assigning crews	Assigning aircraft
<b>Systems</b>	Automated planning and scheduling	Preferential bidding system

MODELS AND SIMULATIONS		
<b>Algorithms and software</b>	Linear programming	Column generation, fatigue avoidance scheduling tool
<b>Programs</b>	GA panel, GA radio stack	
<b>Flight simulator</b>	Real simulator	Software
<b>Flight</b>	Virtual Airlines	
<b>Models</b>	Ground	Air

AIR TRAFFIC MANAGEMENT		
<b>Structure</b>	ATC, GTA, PTLA	Aircraft Manager
<b>Rules/ Standards</b>	Air traffic manual	Guidelines
<b>System Overview</b>	Modes	HMI, FVE, Function, A-SMGCS
<b>Air traffic consulting</b>	Statistics	
<b>Airport and ATM Structure</b>	Growth in air traffic	ATM, Aircrafts, Airports
<b>Air navigation</b>	Control	Data
<b>Monitoring</b>	Surface Radar, primary radar and secondary radar.	Multilateration
<b>Data Integration</b>	Flight information, airport and airline information	Arrivals, departures, delays, crew
<b>Global technology</b>	Optimization	Improvements, solutions
<b>ATM</b>	AOCTF, FOG, MITA, JPTC, METTF, RESCOM	Airport and ATC charges working


PASSENGER FLOW		
<b>Passenger</b>	Global passenger survey	Passenger facilitation
<b>Fast travel</b>		
<b>Services</b>	Baggage service	Customer service
<b>Security and facilitation</b>	Facilitation and passenger data	
<b>Unruly passengers</b>	Passenger data	Border control

<b>Passenger experience</b>	Technology	Making a difference
<b>Airports</b>		
<b>Monitoring</b>	Standards	
<b>Data Integration</b>	Flight information, passenger information	

<b>MAINTENANCE ROUTING</b>		
<b>Aircraft maintenance</b>	Propeller	Motor, wheel
<b>Prevention</b>	Fuel systems and lubrication	Jet engines and piston, corrosion prevention
<b>Aerodynamic</b>		
<b>Air hydraulic</b>	Hydraulic and pneumatic systems	
<b>Miscellaneous systems</b>	Oxygen, pressurization, bleeds systems.	
<b>Test beds and tools</b>	Evidence	
<b>Security</b>	Air safety	Aircraft in good condition
<b>Environment</b>	Environmental care	Healthy fuel, environmental technical
<b>Special places</b>	Painting, marking, labeling	
<b>Repairs</b>	Metallic structures	Composites
<b>Interior Conditioning</b>		
<b>Renewal of Aircraft</b>	Aircraft purchase	

# ANEXO F

## ECUACION DE BUSQUEDA

WEB OF SCIENCE™ 

Regresar a la búsqueda Mis herramientas ▾ Historial de búsqueda Lista de registros marcados 37

Historial de búsqueda: Todas las bases de datos ▾

Conjunto	Resultados		Combinar conjuntos	Eliminar conjuntos
		<input type="button" value="Guardar historial"/> <input type="button" value="Abrir historial guardado"/>	<input type="radio"/> AND <input type="radio"/> OR <input type="button" value="Combinar"/>	<input type="button" value="Seleccionar todo"/> <input type="button" value="X Eliminar"/>
# 2	900	Tema: (optimization model aircraft) Periodo de tiempo=Todos los años Idioma de búsqueda=Auto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
# 1	103	Tema: (Airport logistics) Periodo de tiempo=Todos los años Idioma de búsqueda=Auto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## ANEXO G

### ANÁLISIS BIBLIOMETRICO

A continuación se presenta un análisis bibliométrico general de la temática de investigación. Aquí se encuentran involucradas las 11 líneas de investigación.

A fin de contar una visión macro del panorama de la investigación en modelos de optimización en logística aeroportuaria, se describe a continuación los criterios empleados para la realización del análisis de publicaciones de este ejercicio de actualización, indispensable para la identificación de temáticas de investigación, instituciones líderes y autores relevantes, entre otros.

Frente a las limitantes tanto de la base de datos seleccionada para el estudio como del software para la minería de texto Vantage Point, se puso en consideración la amplitud del estudio y se redefinió la metodología a saber:

- Usar una ventana de observación de (2001-2014).
- Realizar una búsqueda con las palabras claves del área, tales como: modelos, optimización, aeropuerto, logística, logística aeroportuaria, cadena de suministro, entre otros; resumidas en la ecuación de búsqueda realizada.
- Realizar las búsquedas solo en el campo TOPIC, pues este incluye la revisión del título, resumen y palabras claves.
- Filtrar por artículos.
- Filtrar por las "Subject Areas" que competen el campo de estudio actual (Modelos de optimización en logística aeroportuaria).

La búsqueda de los artículos, para aplicación del software, fue realizada en marzo de 2014.

#### **ANÁLISIS DE LAS PUBLICACIONES.**

Para obtener las publicaciones que fueron objeto de análisis de la dinámica de producción de conocimiento a nivel internacional se seleccionó la base de datos de la Web of Science<sup>25</sup> en su plataforma web ISI Web of Knowledge. Las ecuaciones de búsqueda utilizadas, fueron las que se presentaron anteriormente en el **anexo B**. A partir de las ecuaciones de búsqueda, se realizó la exploración,

descarga y procesamiento de los artículos en el software Vantage Point. Se obtuvo una base de datos de 997 artículos para los cuales se identificaron líderes en cuanto a países, instituciones, revistas y autores; además se identificaron las palabras claves más relevantes del tema de investigación.

### Países líderes

Estados Unidos se consolida como el líder en cuanto a productividad científica en el área, seguido por Canadá, Taiwan, Uk. En cuanto a Latinoamérica, no figura ninguno de ellos en el Top 10, sin embargo se observó que al final del ranking general, se encuentra Perú y Venezuela con 1 publicación cada uno.

**Tabla 1.** Ranking de los 10 primeros países con publicaciones en el área

Publicaciones	Países
127	USA
33	Canadá
28	Taiwan
18	UK
15	China
12	Germany
10	Japan
9	Netherlands
9	Singapore
8	Denmark

**Fuente:** Tabla obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point.

Es claro que el número de publicaciones es un output que dependerá en gran medida de los inputs introducidos en el sistema, por lo que es conveniente normalizar este dato en función de los recursos empleados en la investigación. Resulta interesante relativizar la producción en función del personal investigador, pues esto permite identificar las actividades que se desarrollan en el área.

### Instituciones

Como era de esperarse, el líder corresponde a una institución educativa norteamericana, Instituto de Tecnología de Georgia (Georgia Institute

Technology,USA), seguida de La universidad Nacional Central (National Central University, Taiwan) y de la Escuela politécnica (Ecole Polytech, Francia).

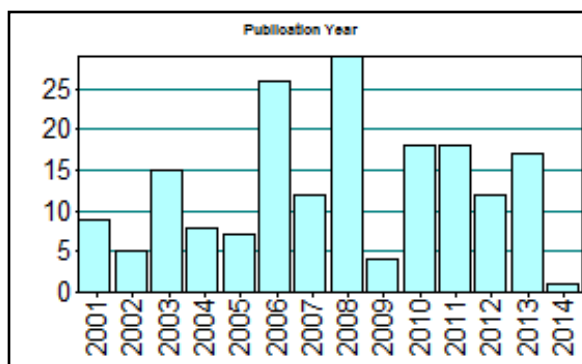
**Tabla 2.** Ranking de las 10 primeras Universidades con publicaciones en el área.

Ranking	Archivos	Organizaciones
1	34	Georgia Inst. Technology
2	27	National Central Univ.
3	24	Ecole Polytech
4	23	Univ. Maryland
5	22	National Kaohsiung First Univ. Science& Technology
6	17	GERAD
7	17	MIT
8	17	National Cheng Kung Univ.
9	17	National Univ. Singapore
10	17	Univ. Illinois

**Fuente:** Tabla obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point.

A continuación se presenta una gráfica dónde se indica la frecuencia con que las Universidad/ Instituciones educativas de la **tabla 2**, publicaron a lo largo del periodo de 2001- 2014. Allí se pudo observar que éste tema te investigación tuvo mayor investigación y publicación en el 2008 y durante el 2010-2013 se ha mantenido constante. Vale la pena aclarar que el 2014 no se toma en cuenta, debido a que el año va por el primer trimestre.

**Figura 1.** Publicaciones en el periodo 2001-2014



**Fuente:** Gráfica obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point

## Revistas.

Un mayor número de publicaciones siempre indica que una revista o journal cuenta con cierto prestigio en el área del conocimiento en el que se especializa. En la **tabla 3** se presenta el ranking de publicaciones obtenido para el universo de artículos seleccionado.

Transportation Science (Transp. Sci.), es la revista más importante en el campo del análisis de transporte. La revista presenta artículos y encuestas que cubren todos los modos de transporte, presentes y futuros a tiempo completos, e investiga cuestiones de planificación y diseño y las preocupaciones económicas, operacionales y sociales relacionadas. La revista es de ámbito internacional con editores de todo el mundo. Las publicaciones incluyen académicos que enseñan métodos cuantitativos para el transporte y los profesionales que trabajan en los problemas de gestión de la cadena de suministro, logística, aviación, ferrocarriles, tráfico de las carreteras, el transporte público y el transporte militar.

European Journal Of Operational Reserch (Eur. J. Oper. Res.), El Diario Central Europeo de la Investigación de Operaciones es el diario oficial de la Österreichische Gesellschaft für Operations Research. La revista ofrece artículos de alta calidad que cubren la teoría y la práctica de la investigación de operaciones y la relación de las operaciones de los métodos de investigación de la economía cuantitativa modernas y administración de empresas. Cada edición amplía la comprensión de los problemas de gestión en los sistemas complejos y apoya el proceso de toma de decisiones.

Entre los principales temas tratados son las finanzas y la banca, la productividad y la eficiencia en el sector público, las cuestiones medioambientales y energéticas; herramientas computacionales para el apoyo de decisiones estratégicas, la gestión de la producción y la logística, así como la planificación y la programación.

Esta revista cuenta con artículos teóricos, así como las contribuciones orientadas a aplicaciones y estudios de casos prácticos. En casos especiales se presentan zonas de particular investigación o un informe detallado sobre resultados reuniones científicas.

La **tabla 3** muestra además del ranking del TOP 10 de las revistas con mayor número de publicaciones en la ISI, y la **tabla 4** muestra las áreas que más se investigaron en éstas revistas

**Tabla3.** Ranking de las 10 primeras revistas con publicaciones en el área.

Revistas	Publicaciones
Transportation. Science	55
European. Journal. Oper. Research.	48
Journal. Aircraft.	35
Journal. Guid. Control Dyn.	34
Computers&Operation Research.	33
Journal. Air Transportation. Management.	28
Journal. Oper. Research. Society.	21
Transp. Res. Pt. e-Logistics. Transportation. Review.	21
Transportation. Research. Record	17
Ann. Operation. Research.	15

**Fuente:** Tabla obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point

**Tabla4.** Ranking de las áreas de investigación en las revistas relevantes

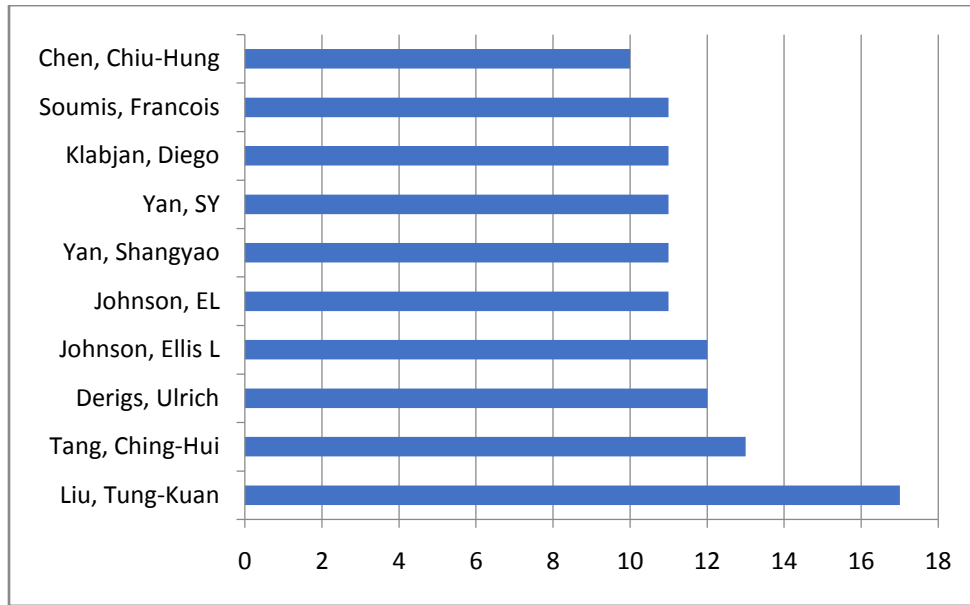
Publicaciones	Áreas
193	Operations Research & Management Science
140	Engineering and Logistics
121	Transportation Air
90	Business & Economics
34	Instruments & Instrumentation
33	Computer Science

**Fuente:** Tabla obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point.

**Autores.**

En la **figura 2** se presentan los principales autores encontrados en los artículos estudiados.

**Figura 2.** Ranking de los 10 primeros Autores con publicaciones ISI



**Fuente:** Figura obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point.

La siguiente tabla, indica las áreas más representativas para los anteriores autores:

**Tabla 5.** Ranking de las áreas en las que publican los 10 autores representativos

Publicaciones	Áreas
58	Operations Research & Management Science
38	Transportation
19	Business & Economics
15	Computer Science
10	Engineering
7	Automation & Control Systems

**Fuente:** Tabla obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point.

### Palabras claves.

Las palabras clave, que se encuentran en la tabla 6, son términos relacionados con el contenido del artículo. Estas palabras nos permiten clasificar el listado de artículos bajo un índice o tema particular. De esta manera, cuando se analiza la frecuencia de las “keywords” usadas por los autores, se encuentra que la palabra clave optimización es mencionada en 213 publicaciones, seguida de transporte aéreo con 189, en tercer lugar Control de tráfico aéreo con 159, en cuarto lugar Programación de la flota de la aerolínea con 145 y en quinto lugar modelos y simulación que es mencionada en 144 artículos ISI, lo anterior puede apreciarse en la **tabla 6**.

En la **figura 3** se puede observar que “optimización” comparte una cantidad significativa de publicaciones con todas las variables restantes, es decir, ese el conjunto de “optimización” se superpone con los conjuntos de las palabras claves: transporte aéreo, control de tráfico aéreo, a su vez se observa que programación de la flota de la aerolínea y modelos y simulación comparten una cantidad significativa de publicaciones al igual que aeropuerto y logística.

**Tabla 6.** Ranking de keywords empleadas en el área de investigación

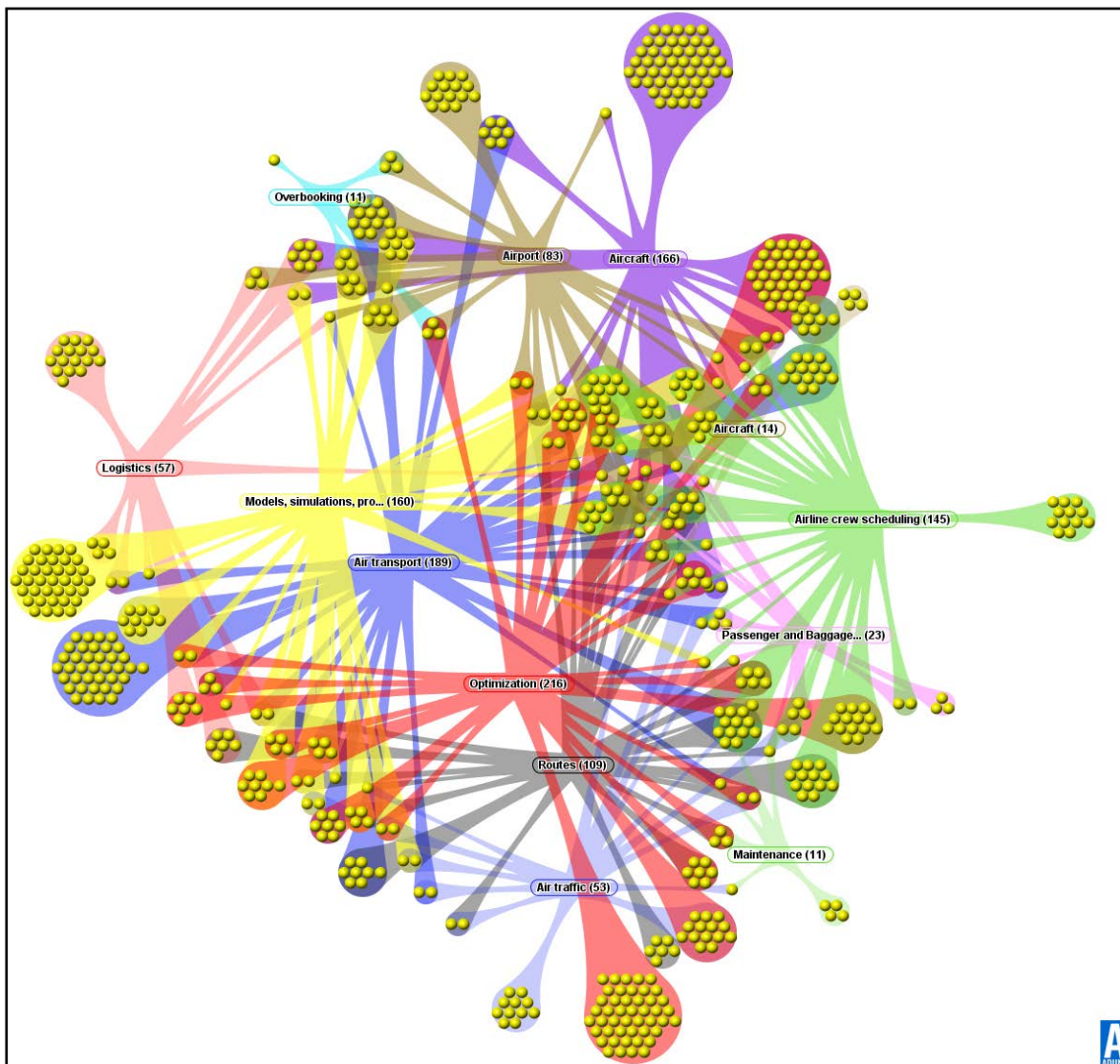
Keywords	Publicaciones
Optimization	213
Air transport	189
Aircraft control	159
Airline crew Scheduling	145
Models and Simulations	144
Routes	109
Airport	83
Logistics	57
Air traffic Management	53
Passenger flow	23
Aircraft sizes	14
Maintenance routing	11
Overbooking	11

**Fuente:** Tabla obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point.

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron de la aplicación de software Vantage Point, y teniendo como punto central la palabras claves de la **tabla 6**, se hace evidente que hay más literatura enfocada hacia esos 10 términos allí mencionados, dentro de los cuales se destacan 3: optimización, transporte aéreo y tráfico aéreo; teniendo en cuenta, además, que dichos grupos de palabras albergan dentro de sí otro conjunto de temas asociados, como es el caso de transporte aéreo que no solo involucra lo que tiene que ver con pasajeros, si no a su vez está relacionado con el tema de transporte de carga.

Es por ello, y debido a la gran cantidad de literatura que se encuentra en éste tema de investigación, que dicho trabajo estará enfocado a tratar los temas que fueron más representativos en el momento que se realizó la búsqueda de la información en ésta área, como lo son: Optimización, transporte aéreo, tráfico aéreo, y programación de la flota aérea. Los cuales a su vez se encuentran relacionados con los otros temas que se mencionan en la **tabla 6**, y se hace más evidente en la **figura 3**, dónde muestra qué tanto se van relacionando entre sí todo el conjunto de palabras seleccionadas.

Figura 3. Aduna de Palabras Claves



Fuente: Aduna obtenida a partir de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del software Vantage Point

## ANEXO H

### PALABRAS CLAVE POR LINEA ESTRATEGICA

#### OPERATION RESEARCH & MANAGEMENT SCIENCE

PALABRAS CLAVE	FRECUENCIA
Operation Research	10
Problems	7
Solutions	5
Optimization	3
Algorithm	3
Automation	3
Heuristic	2
Science	2
Stochastic	2
Models	2
Decision Making	2
Simulation	2
Network	2
Exploration	2
Navigation	2
Objective Function	2
Decision Variable	2
Restriction	2
Experiment	2
Simulation	2
Simulation Model	2
Management issues	2
Solve Managerial problems	2
Information Systems	2
Informations	1
Organisations	1
Computer used	1
Development	1
Strategies adopted	1
Study	1

## ENGINEERING AND LOGISTICS SOFTWARE ENGINEERING

<b>PALABRAS CLAVE</b>	<b>FRECUENCIA</b>
<b>Logistics</b>	3
<b>Model optimization</b>	3
<b>Simulation</b>	2
<b>Interpolation</b>	2
<b>Supply Chain</b>	2
<b>Software</b>	1
<b>Engineering</b>	1
<b>Logistics software</b>	1
<b>development</b>	1
<b>Measurement for logistics</b>	1
<b>MIT engineer</b>	1
<b>Logistic Support</b>	1
<b>Transport and telecommunication</b>	1
<b>Math model</b>	1
<b>Tools</b>	1
<b>Knowledge Ingenineering</b>	1
<b>Abstraction and modelling</b>	1
<b>Specializations Systems</b>	1
<b>Advanced Software</b>	1
<b>Methods : data analysis</b>	1
<b>Methods : statistical</b>	1
<b>Towards</b>	1
<b>Information Engineering</b>	1
<b>Correlation</b>	1

## TRANSPORTATION AIR

PALABRAS CLAVE	FRECUENCIA
<b>Networks</b>	134
<b>Sensor networks</b>	80
<b>routing</b>	57
<b>Transportation</b>	51
<b>Aircraft</b>	40
<b>Controllers</b>	37
<b>Airline</b>	34
<b>Mode of transport</b>	34
<b>Transport air</b>	33
<b>Aviation</b>	27
<b>wireless networks</b>	26
<b>Air quality</b>	24
<b>Transport service</b>	21
<b>Air cargo</b>	20
<b>clustering</b>	19
<b>Sensor network</b>	19
<b>routing protocols</b>	17
<b>scheduling</b>	17
<b>Air arlines</b>	17
<b>ATSG</b>	16
<b>Air travelers</b>	16
<b>performance</b>	16
<b>Runways</b>	15
<b>connectivity</b>	15
<b>localization</b>	15
<b>algorithms</b>	14
<b>Colaboration</b>	14
<b>Airport controllers</b>	13
<b>Mobile computing</b>	13
<b>key management</b>	13
<b>Online enviroment</b>	13

<b>Movement algorithm</b>	13
<b>Delay for aircraft</b>	12
<b>Algorithm sequentially</b>	12
<b>interference</b>	11
<b>protocols</b>	11
<b>Solution quality</b>	11

## **BUSINESS & ECONOMICS**

<b>PALABRAS CLAVE</b>	<b>FRECUENCIA</b>
<b>Customers</b>	18
<b>Gain</b>	16
<b>Price</b>	15
<b>Passenger</b>	13
<b>Commercial</b>	9
<b>Consumer protection</b>	9
<b>Market development</b>	5
<b>Market and industry</b>	2
<b>Simplifying the business new</b>	2
<b>Price monitor</b>	2
<b>Business intelligence</b>	2
<b>Statistics</b>	2
<b>Industry partners</b>	2
<b>Travel Professionals</b>	2
<b>Travel industry</b>	2
<b>Economic data</b>	2
<b>WATS</b>	2
<b>Outlook</b>	2
<b>Airport competition</b>	2
<b>Value chain</b>	2
<b>Analysis</b>	2
<b>Informations</b>	2
<b>Mode shift</b>	2
<b>Demand</b>	2

<b>Financing</b>	2
<b>Cost</b>	1

## INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION

<b>PALABRAS CLAVE</b>	<b>FRECUENCIA</b>
<b>Instruments pilot</b>	10
<b>Motor Control</b>	8
<b>Altimeter</b>	6
<b>Speed and spin</b>	6
<b>Power indicator</b>	5
<b>Engine Operation</b>	3
<b>Navigational instruments</b>	5
<b>ADF</b>	2
<b>DME</b>	2
<b>Flight management system</b>	2
<b>ILS</b>	2
<b>Autopilot</b>	2
<b>CDI</b>	2