

**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD AEROPORTUARIA BASADA
EN LA PREDICCIÓN DEL TRÁFICO AÉREO**

Estudio del Aeropuerto de Barcelona – El Prat

Memoria del Trabajo Final de Grado
Gestión Aeronáutica
realizado por Rubén López Tobal
y dirigido por Liana Napalkova
Sabadell, 06 de Julio de 2016



El sotasignat, *Liana Napalkova*

Professor/a de l'Escola d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFICA:

Que el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota la seva direcció per en/na *Rubén López Tobal*

I per tal que consti firma la present.

Signat:

A handwritten signature in dark blue ink, consisting of several loops and a final upward stroke, positioned to the right of the 'Signat:' label.

Sabadell, 06 de juliol de 2016

FULL DE RESUM – TREBALL FI DE GRAU DE L'ESCOLA D'ENGINYERIA
FULL DE RESUM – TREBALL FI DE GRAU DE L'ESCOLA D'ENGINYERIA

[ES] Análisis de la capacidad aeroportuaria basada en la predicción del tráfico aéreo

[CA] Anàlisi de la capacitat aeroportuària basada en la predicció del tràfic aeri

[EN] Airport capacity analysis based on air traffic forecasts

Autor: Rubén López Tobal

Data: 06 de juliol de 2016

Tutora: Liana Napalkova

Titulació: Grau en Gestió Aeronàutica

Paraules clau

- Català: Predicció, anàlisi, capacitat, aeroport
- Castellà: Predicción, análisis, capacidad, aeropuerto
- Anglès: Prediction, analysis, capacity, airport

Resum del Treball Fi de Grau

- Català: en el present treball es troba i analitza una previsió realitzada per una Xarxa Neuronal Artificial Perceptró Multicapa amb la finalitat de preveure i comprovar, mitjançant les dades recollides (en diferents fonts d'informació) el tràfic de passatgers que tindrà l'aeroport de Barcelona – El Prat per tal de poder prendre mesures d'ampliació de la capacitat a curt termini. D'altra banda, s'exposen les fites rellevants desenvolupades dins el marc de l'ampliació d'aquest aeroport en tota la seva història i els diferents tipus de planificació que es poden dur a terme.
- Castellà: en el presente trabajo se obtiene y analiza una previsión realizada por una Red Neuronal Artificial Perceptrón Multicapa con el propósito de prever y comprobar mediante los datos recogidos (en diferentes fuentes de información) el tráfico de pasajeros que tendrá el aeropuerto de Barcelona – El Prat para observar si se requieren tomar medidas para ampliar la capacidad a corto plazo. Por otro lado, se muestran los hechos más relevantes realizados de ampliación y remodelación de este aeropuerto a lo largo de su historia y los diferentes tipos de planificación que se han llevado a cabo.
- Anglès: at the present study it is obtained and analyzed a forecast realized with a Multilayer Perceptron Artificial Neural Network in order to anticipate and verify the data collected (took it in different sources of information) the passenger traffic that the Barcelona – El Prat airport will receive with the aim to see if it is required to take measures to expand the capacity in the short term. On the other hand, it is showed the most relevant facts made at the airport on remodeling throughout its history and the different types of planning that have been made.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMIENTOS | 8 |
| INTRODUCCIÓN | 10 |
| Estado del Arte y Motivación..... | 10 |
| Objetivos y tareas del proyecto..... | 11 |
| Novedad | 12 |
| Metodología | 12 |
| Equipos y sistemas utilizados | 13 |
| Estructura de la tesis | 13 |
| 1. VISIÓN GENERAL DE LA CAPACIDAD Y PLANIFICACIÓN DEL AEROPUERTO | 14 |
| 1.1. . Situación y evolución del aeropuerto de Barcelona – El Prat..... | 17 |
| 1.2. La previsión del tráfico de pasajeros de un aeropuerto | 17 |
| 1.3. Análisis de diferentes niveles de planificación..... | 18 |
| 1.3.1. Planificación a largo plazo – Definición del plan maestro del aeropuerto y planificación de su capacidad..... | 20 |
| 1.3.2. Planificación a corto y medio plazo – Optimización de la capacidad existente | 23 |
| 2. ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS DESTINADAS A PREVISIÓN DEL TRÁFICO DE PASAJEROS EN AEROPUERTOS..... | 25 |
| 2.1. Métodos de predicción: visión general..... | 26 |
| 2.2. Métodos Cuantitativos: Análisis de series temporales | 28 |
| 2.2.1. Proyección de tendencias | 28 |
| 2.2.2 Métodos de descomposición | 30 |
| 2.3. Métodos Cuantitativos: Modelos Causales..... | 31 |
| 2.3.1. Métodos de Aprendizaje Automático..... | 31 |
| 2.3.1.1. Análisis de regresión Múltiple..... | 32 |
| 2.3.1.2. Análisis Econométrico | 32 |
| 2.3.1.3. Redes Neuronales Artificiales..... | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.2. Modelos de ecuaciones simultáneas..... | 34 |
| 2.3.3. Modelos de equilibrio espacial..... | 35 |
| 3. CASO DE ESTUDIO: PREDICCIÓN DEL AEROPUERTO DE BARCELONA – EL PRAT | 36 |
| 3.1. Descripción general del caso de estudio..... | 36 |
| 3.2. Obtención de datos y contraste..... | 37 |
| 3.3. Predicción del tráfico de pasajeros del aeropuerto mediante <i>WEKA</i> | 40 |
| 3.3.1. Preparación de datos y preprocesado | 41 |
| 3.3.2. Creación y prueba del modelo predictivo..... | 42 |
| 3.4. Análisis y visualización de resultados..... | 49 |
| CONCLUSIONES | 56 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 58 |
| Edición Web e impresa..... | 58 |
| Ilustraciones | 61 |
| ANEXO 1. Código para obtener los meses y años en código <i>Python</i>..... | 63 |
| ANEXO 2. Captura del modelo de entrenamiento MPL-0.03-500000..... | 64 |
| ANEXO 3. Captura del modelo de entrenamiento MPL-0.01-500000 | 64 |
| ANEXO 4. Gráficos y tablas realizadas según el modelo de previsión..... | 65 |
| ANEXO 5. Autorización aprobada por la UAB y solicitada por <i>Aena</i>..... | 67 |
| ANEXO 6. Comunicación mediante correo electrónico con <i>Aena</i> | 68 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.1 – Situación del aeropuerto de Barcelona – El Prat en el 2003 y la posterior a la ejecución del plan director del 2003</i> | 15 |
| <i>Figura 1.2 – Localización de la terminal satélite proyectada en el aeropuerto de Barcelona – El Prat.</i> | 16 |
| <i>Figura 1.3 – Detalle de la terminal satélite del aeropuerto de Barcelona – El Prat</i> | 16 |
| <i>Figura 1.4 – Gráfico de la capacidad total del Aeropuerto de Barcelona – El Prat y la utilizada (Elaboración propia)</i> | 19 |
| <i>Figura 1.5 – Tabla del contenido del Plan Director Barcelona – El Prat 2003 y sus fases de izquierda a derecha (Elaboración propia)</i> | 21 |
| <i>Figura 1.6 – Diferencia entre tráfico real y el estimado en el Plan Director del Aeropuerto de Barcelona (1999) (Elaboración propia)</i> | 22 |
| <i>Figura 1.7 – Registro del tráfico de aeronaves en el Aeropuerto de Barcelona – El Prat del 1986 al 1997 y la previsión hasta el 2010 en el Plan Director (1999)</i> | 22 |
| <i>Figura 1.8 – Gráfico de la capacidad global del aeropuerto con el crecimiento de las horas punta y seguidamente de las horas valle.</i> | 24 |
| <i>Figura 2.1 – Clasificación de los diferentes métodos de predicción (Elaboración propia)</i> | 27 |
| <i>Figura 2.2 – Representación lineal de una proyección de tendencias</i> | 28 |
| <i>Figura 2.3 – Representación exponencial de una proyección de tendencias</i> | 29 |
| <i>Figura 2.4 – Representación parabólica de una proyección de tendencias</i> | 29 |
| <i>Figura 2.5 – Representación de Gompertz de una proyección de tendencias</i> | 29 |
| <i>Figura 2.6 – Arquitectura de una Red Neuronal Artificial (Elaboración Propia)</i> | 33 |
| <i>Figura 2.7 – Diagrama de flujo realizado por las Redes Neuronales Artificiales</i> | 34 |
| <i>Figura 2.8 – Situación de la oferta – demanda en el sector aéreo</i> | 35 |
| <i>Figura 3.1 – Distribución de las variables utilizadas en el fichero Excel del modelo predictivo (Elaboración Propia)</i> | 39 |
| <i>Figura 3.2 – Icono de la herramienta de minería de datos WEKA</i> | 40 |
| <i>Figura 3.3 – Distribución del conjunto de la muestra de todas las variables en WEKA (Elaboración Propia)</i> | 42 |
| <i>Figura 3.4 – Arquitectura empleada en el Perceptrón Multicapa de la Red Neuronal Artificial (Elaboración Propia)</i> | 43 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 3.5 – Presentación del inicio del programa WEKA (Elaboración Propia)</i> | 43 |
| <i>Figura 3.6 – Ventana de WEKA Explorer (Elaboración Propia)</i> | 44 |
| <i>Figura 3.7 – Selección del fichero para realizar el entrenamiento (Elaboración Propia)</i> | 44 |
| <i>Figura 3.8 – Parte reemplazada por la variable fecha (Elaboración Propia)</i> | 45 |
| <i>Figura 3.9 – Ventana de WEKA Explorer con el fichero TrainingModel (Elaboración Propia)</i> | 45 |
| <i>Figura 3.10 – Ventana Selected attribute de WEKA Explorer (Elaboración Propia)</i> | 46 |
| <i>Figura 3.11 – Ventana Classify de WEKA Explorer (Elaboración Propia)</i> | 46 |
| <i>Figura 3.12 – Modificación de parámetros en WEKA Explorer (Elaboración Propia)</i> | 47 |
| <i>Figura 3.13 – Previsión con parámetros iniciales: L=0.3 N=500 (Elaboración Propia)</i> | 48 |
| <i>Figura 3.14 – Gráfico comparativo del conjunto de las previsiones obtenidas sobre el tráfico (Elaboración Propia)</i> | 49 |
| <i>Figura 3.15 – Gráfico comparativo del conjunto de previsiones por error medio absoluto mensual (Elaboración Propia)</i> | 50 |
| <i>Figura 3.16 – Gráfico comparativo del conjunto de previsiones por error medio absoluto mensual (Elaboración Propia)</i> | 51 |
| <i>Figura 3.17 – Previsión tráfico de pasajeros en aeropuertos del Reino Unido (2010-2050)</i> | 53 |
| <i>Figura 3.18 – Distribución de la capacidad disponible, ocupada y la diferencia con la prevista por MLP-0.01-500000 (Elaboración Propia)</i> | 54 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 3.1 – Descripción de las variables utilizadas en el modelo predictivo (Elaboración Propia)</i> | 38 |
| <i>Tabla 3.2 – Comparación del tiempo requerido para la construcción del modelo (Elaboración Propia).</i> ... | 51 |

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer toda la ayuda recibida por parte de la tutora del trabajo, Liana Napalkova, por su implicación con el trabajo y por la orientación y motivación que he recibido por su parte. Estoy seguro que sin su apoyo, este trabajo no podría haberse desarrollado de la forma tan exitosa como para mí lo ha sido.

En segundo lugar, a mis familiares y amigos de los cuales sin su apoyo difícilmente podría haber encarado el reto de la investigación, redacción y formalización de un contenido que en un primer momento me resultaba una tarea bastante compleja de afrontar.

En tercer lugar, me enorgullece mencionar el apoyo recibido por los compañeros de trabajo de *Vueling Airlines*, los cuales los aprecio mucho y parte del empuje que he recibido para completar el presente trabajo ha sido de su parte.

A la Universidad Autónoma de Barcelona como a todo el personal que se involucra para que año tras año se sigan formando estudiantes, tanto por haber proporcionado los trámites necesarios para poder mantener el contacto con *Aena*, como de prestar las instalaciones para realizar parte de los encuentros con la tutora del trabajo.

Para acabar, agradezco a *Aena Aeropuertos* su respuesta sobre la entrevista que se le solicitó, la cual se me requirió una autorización por parte de la UAB, como también por haberme facilitado parcialmente la información solicitada. Es cierto que finalmente no se ha podido realizar el encuentro presencial tan esperado, pero muestro mi agradecimiento por el tiempo que le han dedicado a responder mi correo y a la información detallada del correo electrónico. Por otra parte, también me gustaría dar las gracias por haber podido ser partícipe del *I Seminario Aeroportuario* en Barcelona el cual me ha proporcionado un punto de vista más crítico respecto al sector aéreo.

A todos ellos, ¡muchas gracias!

Rubén López Tobal

INTRODUCCIÓN

Estado del Arte y Motivación

El mercado aeronáutico es propenso a posicionarse en escenarios muy competitivos con aerolíneas que compiten entre ellas con estrechos márgenes de beneficios en sus balanzas contables. Día tras día, se encuentran más aerolíneas compitiendo por precios más bajos en vez de por servicios prestados. Esto reduce considerablemente los márgenes de beneficios que poseen, provocando un crecimiento de la demanda, generando más consumidores dispuestos a pagar menos por un billete de avión como analiza la empresa auditora *PwC* examinando la tendencia del entorno económico aeronáutico [Clayton y Hilz 2015].

La constante expansión del sector aeronáutico, uno de los quebraderos de cabeza para los responsables en prever el tráfico de pasajeros, es el elemento central que se analiza en este trabajo. El aeropuerto o la flota de aviones son difícilmente adaptables a las demanda de cada período, se consideran del largo plazo. La necesidad de realizar exhaustivos modelos que ayuden a predecir la demanda del aeropuerto, es imprescindible saber cuándo incrementar la capacidad aeroportuaria en caso de se requiera. En este trabajo, se realiza la previsión del corto y medio plazo del aeropuerto de Barcelona – El Prat.

El problema mencionado ya fue alertado por *Eurocontrol*, cuando emitió un informe [EUROCONTROL 2013] en 2013 el cual advertía que los aeropuertos de Europa dejarán de operar 1,9 millones de vuelos en 2035 por falta de capacidad. Esta cifra según el ente europeo lo iguala a 120 millones de pasajeros potenciales que no podrán viajar, lo que equivale al 12% de la demanda total no cubierta. El departamento de planificación y previsión antiguamente era poco relevante para una compañía o aeropuerto, debido a que no era una gran fuente de ingresos. En la actualidad, en mercados tan cambiantes el desarrollo de la empresa va ligado a la importancia y preocupación que manifieste en su futuro invirtiendo capital en departamentos de previsión y planificación. Un ejemplo es el departamento de I+D+I de una compañía cualquiera. El departamento en sí, no genera ingresos directos, pero con el desarrollo que realiza, contribuye al crecimiento y mejora del servicio prestado. En el caso de estudio se proporcionan soluciones para cubrir la demanda aumentando la capacidad operativa del aeropuerto.

En el caso que un aeropuerto crezca más de lo esperado, deberá escoger uno de los siguientes escenarios: tener que dejar de operar vuelos por falta de capacidad o congestionar las infraestructuras y provocar pérdidas a las compañías aéreas por la cantidad de retrasos que les generará. Para evitar tener que tomar esa elección, se considera de vital importancia realizar previsiones muy precisas, para realizar análisis del futuro y disponer del margen suficiente para desarrollar posibles actuaciones. Sólo de esta forma se mejorará la calidad del servicio y el funcionamiento del aeropuerto.

Objetivos y tareas del proyecto

En este trabajo se marcan unos objetivos principales a alcanzar que se definen para la correcta consecución del trabajo. El objetivo del trabajo de carácter global es ver cómo de preciso es el modelo escogido con el tráfico registrado en el Aeropuerto de Barcelona – El Prat durante el segundo semestre del 2015, disponiendo de datos de enero del 2004 a junio del 2015. Con el resultado, se pretende contrastar el resultado obtenido con el departamento responsable del propio aeropuerto para ver cuánto se asemejan los datos y de esa forma poder realizar un análisis más en profundidad de las diferencias entre éstos.

Con la intención de cumplir con esos objetivos, se han definido las siguientes actuaciones para llevarlos a cabo:

1. Analizar la importancia de tener buenos modelos de predicción que consigan una capacidad acorde al tráfico de pasajeros.
2. Examinar las diferentes metodologías para predecir el tráfico de pasajeros para realizar una correcta planificación.
3. Buscar, formalizar y analizar la gran cantidad de datos obtenidos (minería de datos implementación) de las variables escogidas.
4. Aprender y entender el funcionamiento de la herramienta de minería de datos *Weka* para realizar el correcto entrenamiento y prueba del modelo
5. Realizar la implementación de la función *MultilayerPerceptron* utilizando la fuente de datos elaborada para obtener un resultado fiable con una precisión lo máxima posible.
6. Extraer las conclusiones necesarias de los resultados obtenidos para poder tomar las medidas de aumento de capacidad oportunas.

Novedad

El trabajo presenta dos aspectos novedosos: la realización de una buena previsión con información al alcance de toda la sociedad y cómo a su vez una herramienta académica de minería de datos impulsada por una universidad puede contribuir a obtener resultados a tomar en consideración.

Un aspecto muy a tener en cuenta, como se hace mención, es que la totalidad de la información utilizada para encontrar los resultados no es de carácter confidencial, y por lo tanto está a la total disposición de la sociedad. Si se tiene en cuenta que los organismos tales como *Aena* o *Eurocontrol*, poseen información privada y confidencial como la solicitud de Slots o que los históricos están acotados a 10 años, es remarcable que un modelo que no tiene acceso a tal cantidad de información sea capaz de dar resultados tan aproximados si se tiene en cuenta que el futuro no se puede controlar.

El otro aspecto, y no menos importante es encontrar una solución válida a través de un modelo obtenido por una herramienta desarrollada por una universidad para el aprendizaje totalmente transparente y de código libre. No necesariamente se necesitan costosos programas para realizar previsiones.

Metodología

Para el desarrollo del proyecto, se ha trabajado mediante la planificación con la herramienta de soporte *Project*. Por otro lado, se han utilizado otros paquetes ofimáticos de *Microsoft Office*. En el desarrollo de la parte práctica, se ha requerido de la herramienta de minería de datos *WEKA*, para desarrollar la estimación y predicción del tráfico de pasajeros.

El trabajo se ha realizado dividiendo todas las tareas en dos grandes bloques: la parte teórica y la parte práctica. Para la elaboración de la parte práctica y con el fin de poder tener la entrevista con la entidad aeroportuaria (*Aena*) lo más temprano posible, se ha planificado el desarrollo de la parte práctica en primer lugar y acudir con los resultados obtenidos, aunque lamentablemente no se haya podido realizar. Paralelamente, con menos prioridad, se ha completado paulatinamente la parte teórica, siendo una tarea que se puede definir con mayor exactitud, pudiendo añadir los conceptos asimilados durante la parte práctica.

Se ha velado para que el trabajo no haya visto afectado por la gran cantidad de datos trabajados, la certeza de los datos encontrados, la correcta selección de los atributos para el estudio y las escasas fuentes de información que se han encontrado para poder obtener la información y contrastarla. El no haber tenido especial cuidado con la recogida de los datos, la selección de los atributos más relevantes y determinantes como la realización de extensas búsquedas por páginas web, podrían estos riesgos haber afectado a la calidad de la solución obtenida y las propuestas derivadas de ésta.

Equipos y sistemas utilizados

Los equipos y sistemas utilizados para la ejecución de este trabajo han estado los siguientes:

- HP Pavilion dv6 Notebook PC ®
 - Edición Windows 10 Home Versión 1511
 - Procesador: Intel ® Core™ i7-3610QM CPU 2.30 GHz
 - Tipo de Sistema: Sistema operativo de 64 bits
 - Fabricante: Hewlett-Packard ®
- Weka-3-8-0.exe ©
 - Edición 3.8.0
 - Sistema operativo Windows® de 64 bits, tener instalado Java™ de 64 bits VM 1.8 de Oracle ®
 - Memoria necesaria: 105,5 MB
- Bloc de Notas
 - Versión 6.2 (Compilación 9200) y Licencia CLUF (EULA)
- Python™ 3.4.5rc1
 - Requiere el instalador Python AMD64 para Windows 64-bit
- Microsoft® Office 2013 (Word, Excel, Outlook y Project)
 - Procesador: x64 bits de más de 1 GHz, Versión: 4.0
 - Memoria RAM de 2 GB y disco duro de 3 GB de espacio disponible en disco
 - Tarjeta gráfica DirectX 10® y una resolución de 1024 x 576 o superior
 - Conexión a internet: Internet Explorer 8 o superior

Estructura de la tesis

Introducción: descripción de la situación general y las necesidades de encontrar buenos modelos para hacer previsiones

Visión general de la capacidad y planificación del aeropuerto: cómo se realiza actualmente la predicción en los aeropuertos y la planificación de su capacidad

Análisis de las metodologías destinadas a previsión del tráfico de pasajeros en aeropuertos: presentación y diferencia de las diferentes metodologías para realizar previsiones

Caso de estudio: creación, entrenamiento, testeo y análisis de la metodología utilizada para el aeropuerto de Barcelona – El Prat

Conclusiones: validez de los resultados y posibles soluciones

Anexos: código utilizado, autorización requerida por *Aena* y conversación mantenida por correo electrónico

1. VISIÓN GENERAL DE LA CAPACIDAD Y PLANIFICACIÓN DEL AEROPUERTO

Los servicios de transporte son elementos indispensables para el crecimiento de la economía, pero presentan una serie de peculiaridades. El hecho de que sean servicios no almacenables, indivisibles, estacionales (la gran mayoría), muy costosos y con infraestructuras duraderas, hace que se tenga que llevar una buena planificación del servicio que se pretende prestar.

En este capítulo, se va a explicar todo lo que representa el aeropuerto de Barcelona – El Prat, tanto a nivel regional, estatal como para toda la región sudeuropea. Toda la información relevante que ha ido aconteciéndose, su capacidad para seguir expandiéndose y su espectacular crecimiento durante los últimos años.

Se analiza por otro lado cómo las instalaciones han ido experimentando cambios dentro de su capacidad de absorber pasaje, como de los sucesivos desarrollos que han ido realizándose con la ampliación de la pista existente, la construcción de la nueva pista y de la nueva terminal de pasajeros. Como apunte, se presenta el proyecto encargado al taller de arquitectura de Ricardo Bofill, para la construcción de una nueva terminal dentro del aeropuerto para poner fin al problema de capacidad en el momento que se prevea esa necesidad.

En el punto 1.2, se trata la visión general que aporta la previsión del tráfico de pasajeros dentro de un aeropuerto. Las estimaciones y predicciones del tráfico no son tareas triviales, puesto que intervienen gran multitud de variables para su obtención. Con la intención de que los datos obtenidos sean lo más ajustados posibles, se trata de recopilar el máximo de períodos de cada una de las variables. De esta forma, la predicción en condiciones normales será muy similar a la que se obtenga en el período predicho.

Para acabar, en el punto 1.3 se detallan los diferentes niveles de planificación. Las medidas para satisfacer la demanda de pasaje, y por lo tanto de capacidad, pueden dividirse en predicciones a corto, medio y largo plazo. Las predicciones a corto y medio plazo son períodos que abarcan hasta un año de duración. A partir de un año en adelante, se considera una predicción a largo plazo. Mientras que en el corto y medio plazo se busca optimizar los niveles de capacidad con medidas correctivas sin reformas estructurales aparentes, en el largo plazo encabezarían la construcción de una terminal o una pista de aterrizaje, la ampliación de los terrenos del aeropuerto o mejorar la conexión intermodal entre diferentes medios de transporte.

1.1. Situación y evolución del aeropuerto de Barcelona – El Prat

El aeropuerto de Barcelona se ha ido posicionando a lo largo de los años como uno de los principales aeropuertos del sur de Europa. Uno de los perfiles de pasajeros que más se ha incrementado es el de cruceristas, que gracias a la cercanía con el mar Mediterráneo, utilizan el aeropuerto para realizar la conexión con el puerto de Barcelona e iniciar su travesía. Por otro lado, cuenta con centros de conexión de aerolíneas *low cost* como *Vueling*, *Easyjet* o incluso *Ryanair* que establece su propia base en verano del 2016 posicionándolo como aeropuerto de referencia Europeo.

Desde la creación del aeropuerto de El Prat en 1919, el crecimiento en nombre de pasajeros ha ido creciendo lentamente. En el año 1992 con la llegada de las olimpiadas el tráfico experimentó un fuerte crecimiento. Con las mejoras técnicas en la zona de operaciones del aeropuerto en 1994, con la incorporación del ILS para realizar aterrizajes con instrumentación, ayudó a ampliar la capacidad de 38 operaciones/hora a 50 [AENA 2016a]. También la liberalización del transporte aéreo en 1995 contribuyó a que ese crecimiento fuera más marcado. Gracias al mediático evento y al fuerte crecimiento de la década de los 80, se promocionó la marca Barcelona, la cual comenzó a generar turismo y pasajeros a la capital catalana. La presencia de nuevas aerolíneas hizo que se fueran abriendo nuevas rutas. Con ello, en 2003 se realizó un ambicioso Plan Director para realizar la construcción de la tercera pista del aeropuerto. Con ello, se aumentaron las operaciones por hora ayudado en parte por la ampliación de la pista 07L-25R tanto en longitud como en anchura para poder acoger aeronaves de tipo F.

El posterior problema surgió cuando las pistas podían absorber mayor número de vuelos, pero los aviones no podían acceder a la terminal por congestión tanto en rampa como en la terminal T2. En el mismo año 2003, se vio la necesidad futura de construir una nueva terminal, originalmente llamada Nueva Terminal Sur. Como se muestra en la figura 1.1 que aparece en dicho plan director, vieron la necesidad de realizar el proyecto. No sólo se había ideado en ampliar la superficie, sino también en el campo de vuelos, *fingers*, cintas de equipaje y otros elementos para poder atender a mayor número de pasajeros. La inauguración de la nueva terminal se realizó en 2009, 6 años después de que se presentara el plan director.

| ANTES PLAN DIRECTOR | | FUTURO |
|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 845 ha | Superficie Aeropuerto | 1.533 ha |
| 23 M/pax | Capacidad Aeropuerto | 40 M/pax |
| 52 ops/h. | Operaciones - hora | 90 ops/h |
| 2 cruzadas | Campo de vuelos | 2 paralelas 1 transversal |
| 1 cabecera | Categoría II/III | 4 cabeceras |
| 103.000 m ² | Superficie Terminales | 670.000 m ² |
| 70 | Stands | 168 |
| 24 | Pasarelas | 73 |
| 113 | Mostradores | 439 |
| 14 | Cintas equipajes | 31 |
| 35.000 m ² | Terminales de Carga | 160.000 m ² |
| - | Parque Aeronáutico | 50 ha |
| - | La City | 150 ha |

Figura 1.1 – Situación del aeropuerto de Barcelona – El Prat en el 2003 y la posterior a la ejecución del plan director del 2003

El aeropuerto actualmente tiene una capacidad de operar hasta 90 vuelos por hora y gestionar un total de 55 millones de pasajeros. En ese escenario, y viendo el fuerte crecimiento que estaba experimentando el aeropuerto entre los años 2005 y 2007 con cerca de 33 millones de pasajeros transportados al año, se llegó a plantear sobre si la capacidad de la infraestructura actual no iba a ser suficiente en los próximos años.

Por esa razón, en 2010 se ordenó al taller de arquitectura de Ricardo Bofill el proyecto para la construcción de una terminal satélite como se puede ver a continuación en la figura 1.2. Cuando en los posteriores años, se vio que la T1 era capaz de absorber tal demanda de pasajeros, y el ritmo de crecimiento se ralentizaba, se decidió no llevar a cabo la construcción de la terminal satélite hasta que el tráfico no aumentase. A día de hoy, el proyecto se encuentra suspendido, a la espera de que se requiera dicha capacidad adicional.



Figura 1.2 – Localización de la terminal satélite proyectada en el aeropuerto de Barcelona – El Prat.

Con la construcción de la T1, y una superficie de 500.000 m², prácticamente todas las aerolíneas fueron trasladándose paulatinamente de la antigua a la nueva terminal. Compañías como *Ryanair* o *Easyjet* han sido de las pocas que han mantenido sus servicios en la T2. Ese es el motivo por lo que la T1 se encuentra actualmente con mayor congestión que la terminal T2. La entidad aeroportuaria está llevando diversas reformas en la T2 como la profunda remodelación de la T2A para volver a atraer parte de las compañías a la antigua terminal y de esa forma repartir el pasaje. Aún así, en los próximos años se espera que se inicie el ambicioso proyecto de la terminal satélite si no es posible distribuir el tráfico entre las instalaciones ya existentes.

La nueva terminal, estará localizada justo a los pies de la actual torre de control. El diseño en forma de pájaro y a su vez de avión de la terminal, se ha diseñado para que no afecte al campo de visión de la torre de control. La terminal se ha ideado para que sea una extensión de la actual T1 y su acceso se realizaría mediante un tren ligero que conectaría las terminales T1 con la terminal satélite. La capacidad que se espera abordar es de 25 millones de pasajeros al año llegando a aumentar la capacidad total del aeropuerto a 80 millones de pasajeros al año. Dicha capacidad quedaría desglosada de la siguiente manera: la T2 con 27 millones de pasajeros al año, T1 con 25 millones de pax/año y T1 satélite con 25 millones pax/año.

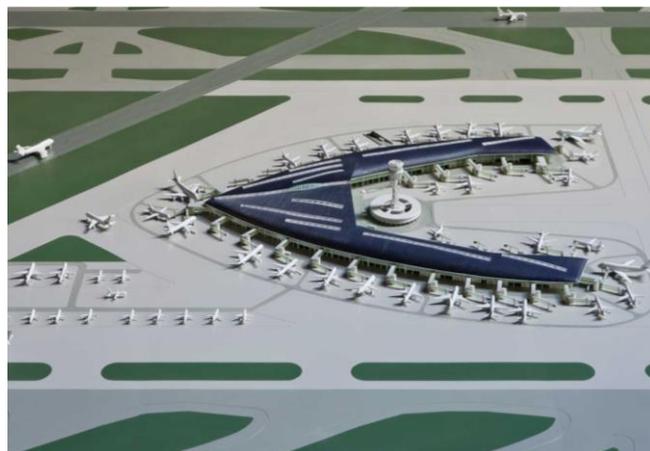


Figura 1.3 – Detalle de la terminal satélite del aeropuerto de Barcelona – El Prat

1.2. La previsión del tráfico de pasajeros de un aeropuerto

Como se ha visto en el punto 1.1, la capacidad de un aeropuerto es un elemento fundamental para marcar el futuro de la región y el desarrollo de éste. Las infraestructuras de las que dispone, las medidas para aumentar su distribución de la optimizar la demanda, igual que el resto de infraestructuras como carreteras, líneas ferroviarias o estaciones de autobús, no son ni asequibles ni temporales. Una infraestructura de esas características suele dar servicio durante más de 30 años, provocando un gran impacto medioambiental, principalmente debido a la gran superficie que ocupa y la actividad económica que genera en la zona. Por poner un ejemplo, la terminal T2 entró en funcionamiento en el 1992 y pese a pequeñas reformas que se llevaron a cabo, actualmente se encuentra en perfectas condiciones. Otro ejemplo, aunque no pertenece al sector aeronáutico, es la estación de Francia que se encuentra en Barcelona, cercana al zoo. La inauguración fue en 1929 y pese a los desperfectos ocasionados en la Guerra Civil, y su posterior reforma, actualmente se encuentra perfectamente operativa [ADIF 2016].

La fuerte inversión que se realiza para construir un aeropuerto o ampliarlo, no puede hacerse en base a especulaciones o sin la garantía de que se amortizará y recuperará la inversión. Por ese motivo, para realizar la cuantiosa inversión reduciendo el riesgo a que no sea amortizada, se hacen previsiones del tráfico que éstas tendrán. Una vez las previsiones avalan que habrá un fuerte o moderado crecimiento, siempre hay un margen de riesgo. Cuanto más largo sea el período predicho, más variación se podrá esperar [De Neufville y Odoni 2013], puesto que el riesgo y la incertidumbre crecerán cuanto más largo sea el período. La incertidumbre, como la macroeconómica, existe aunque el riesgo se reduce considerablemente. Por ese motivo, se emplean otras acciones como incitar a las aerolíneas que no programen todos sus vuelos en las franjas de mayor congestión (horas pico) y se distribuyan también en las horas de menor congestión (horas valle) y de esta forma aumentar el tráfico considerablemente sin necesidad de inversiones aparentes, optimizando las instalaciones ya existentes como se pretende obtener en esta tesis en períodos de corto y medio plazo.

El principal inconveniente de las infraestructuras es que su construcción puede durar entre cinco y diez años en completarse. Por ese motivo, se realizan unos pasos intermedios antes de su construcción para comprobar si el proyecto es o no viable. El Plan Director se inicia con los datos históricos de la entidad aeroportuaria de la evolución del tráfico registrado, cuyos datos son clave para poder predecir el tráfico. Seguidamente, con esos datos junto con otros que se considere influyentes en el tráfico de pasajeros, se construye un modelo de predicción. Una vez obtenida esa información, se analiza si con la capacidad actual el aeropuerto puede satisfacer la demanda futura. En caso que no sea así, se empiezan a coordinar los diferentes departamentos para encontrar una solución al problema que se les planteará en un futuro cercano.

Tal y como se ha visto en el capítulo 1.1, en el 2010 se realizó el proyecto de la nueva terminal T1 satélite, debido a una preocupación que se generó por el constante crecimiento del aeropuerto de Barcelona-El Prat. En el momento de tener completado todo el proyecto, evidenciaron cómo ese crecimiento no iba a seguir el ritmo esperado, por lo que se optó por una decisión sensata: preservar el proyecto y ejecutarlo cuando la predicción marcara niveles superiores a la capacidad. Causado en mayor medida por la crisis global que afectó a todo el mundo, uno de los servicios que la población dejó de demandar, fue el aeronáutico. Actualmente el proyecto finalizado se encuentra a la espera de su ejecución, por lo que el capital invertido en éste, 8 millones de euros por el momento perdidos

[Mercado Financiero 2008] permitirá que no haya que esperar al estudio y desarrollo de un nuevo proyecto, agilizando sustancialmente el proceso.

En el caso de que no se hubiera paralizado el proyecto y se hubiera realizado su ejecución, ahora el aeropuerto sería poseedor de infraestructuras infrautilizadas por valor de 600 millones de euros, con el coste de mantenimiento difícil de asumir para los ingresos que le generarían. Para *Aena*, en caso de que las previsiones marquen de nuevo un crecimiento, estarán listos para actuar con medidas ya estudiadas y aprobadas.

1.3. Análisis de diferentes niveles de planificación

La predicción y posterior planificación son aspectos de relevante interés a nivel social. Su uso es muy amplio, y generalmente se emplea para escenarios económicos, meteorológicos entre muchos otros. Como veremos a lo largo de este capítulo, en el ámbito de la capacidad de una infraestructura aeroportuaria, se puede dividir en dos categorías en función del tiempo que comprenda.

La capacidad de un aeropuerto siempre se ve afectada en mayor parte por dos factores: la zona de operaciones mayormente utilizada por aeronaves y servicios de emergencia y auxiliares, y por otro lado tenemos la zona terminal, utilizada por servicios de *handling*, zonas comerciales y filtro de seguridad. Ambos espacios son muy importantes para definir la capacidad que un aeropuerto puede llegar a ofrecer.

Las instalaciones de un aeropuerto, siempre deben ser diseñadas para poder aguantar el tráfico en este durante las horas punta. Es decir, que el espacio sea capaz de absorber la cantidad de pasajeros suficiente para que no llegue a congestionar ninguna de las dos zonas anteriormente citadas. Por esa razón, generalmente los aeropuertos disponen de espaciaosas áreas en las terminales, por ejemplo, que se encuentran vacías durante gran parte del día.

Como se ha visto, tanto la zona de operaciones, como la zona de terminal son papeles clave para poder gestionar un volumen de pasajeros elevado. Si la zona de operaciones no es capaz de coordinar suficientes vuelos, las terminales por mucha capacidad que tengan no se rentabilizarán según lo que se había ideado. Si por un suponer, sucede a la inversa, la terminal no será capaz de absorber al pasaje que llegue o salga del aeropuerto, pudiendo provocar retrasos en las salidas de los vuelos, y por lo tanto limitando la capacidad de operaciones. Es por esto, que la capacidad de un aeropuerto se establece según la capacidad máxima menor entre el espacio terminal o el de operaciones. Un claro ejemplo, como se ha explicado a lo largo del capítulo 1, el aeropuerto de Barcelona realizó obras de ampliación en la T2, posteriormente equipó las pistas con ILS para aumentar su capacidad operativa, seguidamente la ampliación y mejora de la T2, la construcción de la tercera pista hasta concluir con la construcción de la T1. De esa forma, pudo ir equilibrando las capacidades que se ofrecían en ambos espacios.

Las ampliaciones fueron generando aumentos considerables al largo de estos últimos años, tal y como se puede ver en la figura 1.4. El tráfico de pasajeros (en color azul) ha mantenido un crecimiento constante, a excepción de los años 2008 y 2009 por la complicada situación económico-financiera a nivel global. De color granate aparecería el margen del aeropuerto en función del año, para llegar a su límite de capacidad teórica.

Histórico de la capacidad operativa del aeropuerto de Barcelona - El Prat

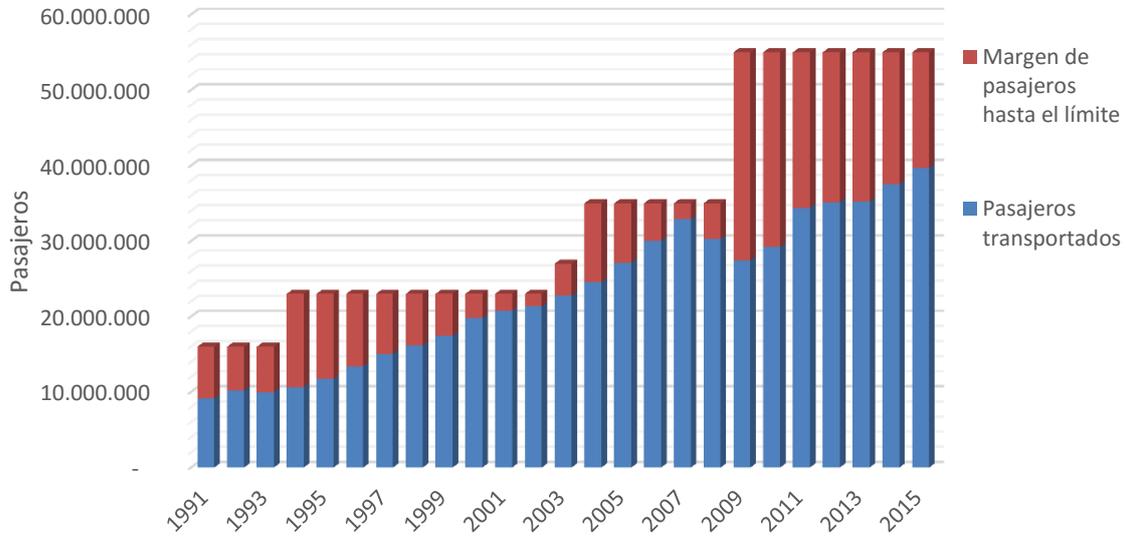


Figura 1.4 – Gráfico de la capacidad total del Aeropuerto de Barcelona – El Prat y la utilizada (Elaboración propia)

Las medidas que se fueron realizando a nivel estructural de la zona aire y tierra, las podríamos considerar como estratégicas y siempre a años vista. Pero no todas las acciones que se realizan son pensando en el largo plazo. La agilización de los filtros de seguridad, la mejora en los procesos de embarque o la distribución uniforme de los vuelos a lo largo del día son ejemplos de medidas a corto y medio plazo en las que se podrían poner en práctica en pocos meses sin grandes esfuerzos económicos.

Excepcionalmente, un aeropuerto puede llegar a operar por encima de su capacidad. Un claro ejemplo está en el aeropuerto Internacional de la ciudad de México (AICM) [Excelsior 2016], que intenta gestionar más vuelos de los que su capacidad le permite. Esto actualmente está provocando retrasos en las compañías que operan, puesto que tienen que distribuir sus operaciones hasta que se encuentran en horas de baja demanda (horas valle) para poder realizar el vuelo. El problema que tiene es que no dispone de más espacio para operar, por lo que se ha optado construir uno totalmente nuevo a unos kilómetros de éste para repartir el tráfico, como se hace en ciudades con más de un aeropuerto como Londres, París o Nueva York.

Pero también representa un aspecto económico fundamental. Según un estudio que llevó a cabo Eurocontrol en 2004, cada minuto de retraso que tiene una compañía aérea le supone 72 euros de coste [Silió 2013]. Por lo que tanto aerolíneas, organismos comunitarios, aeropuertos como los mismos pasajeros son los interesados en que los retrasos sean lo más bajos posibles. Otro estudio, ordenado por Administración Federal de Aviación en 2010 dictaminó que los retrasos le suponen a la compañía un total de 8 billones de dólares al año y a los pasajeros 17 billones de dólares en función de costes adicionales que tengan que cubrir, como el coste de oportunidad de cada pasajero [Mashable 2014]. Es debido al elevado coste que representa y a la multitud de afectado que se intenta siempre realizar buenas planificaciones para situar al mínimo el número de vuelos retrasados.

1.3.1. Planificación a largo plazo – Definición del plan maestro del aeropuerto y planificación de su capacidad

Como sucede en gran parte de disciplinas académicas, tales como la contabilidad y las finanzas, se entiende como largo plazo aquel período que comprende más de un año de duración. Por consiguiente, en términos de planificación, el largo plazo representa aquellos estudios que su finalidad es hacer una previsión de períodos superiores a un año. En el sector aeroportuario como en algunas otras disciplinas, las planificaciones se realizan bajo el nombre de plan maestro o plan director. El encargado de ordenarlo y aprobarlo es el órgano de gobierno correspondiente, en el caso de España el Ministerio de Fomento, mediante una orden ministerial, aunque se requiere de la ayuda y gran colaboración del administrador de la infraestructura aeroportuaria, en el mismo caso, *Aena*.

Para la realización del Plan Director del Aeropuerto de Barcelona en el 1999 se siguió un orden para su confección y aprobación. La cronología que presenta el actual documento con la información que lo integra es la que muestra la figura 1.5. Puesto que la puesta en marcha del proyecto, compromete a numerosas partes y a gran cantidad de recursos, la formalidad y su estructura son claves. La información se refleja siguiendo cinco grandes bloques: confección de la memoria, definición de los planos, análisis e información importante recogida en los apéndices, la diligencia del Plan que se aprueba por el Ministerio de Fomento y por último, la aprobación en el Boletín Oficial del Estado para que quede constancia.

En la memoria, se encuentra toda la información del problema o déficit que presenta la infraestructura, planificación de las actuaciones a llevar a cabo, instrumentos de desarrollo, datos relevantes como las predicciones de la demanda que avalen el plan, el impacto y la programación económica destinada a cada fase, plan de inversión por fases, guías estratégicas para la consecución, ámbitos y normativa de desarrollo de la zona de servicio y las posibles afecciones medioambientales y del territorio.

La sección de planos recoge todas las representaciones gráficas necesarias para realizar el proyecto siguiendo el diseño, sistemas y localizaciones indicadas previamente por los arquitectos encargados. Algunos ejemplos de planos serían el del actual emplazamiento del aeropuerto, las calificaciones urbanísticas vigentes, la delimitación de la zona de servicio, las infraestructuras de movilidad terrestre actuales o proyectadas, programa de actuaciones inmediatas o un análisis del ámbito de incidencia del impacto acústico.

Por lo que refiere a apéndices, contiene toda información elaborada que no se refleja o se muestra parcialmente en la memoria, para la construcción del plan. Algunos ejemplos serían las expropiaciones realizadas para la consecución del proyecto, el tráfico histórico y previsto del aeropuerto, la situación de movilidad por vías terrestres de los pasajeros (vehículo particular, ferrocarril, tren ligero, autobuses urbanos e interurbanos...), análisis detallado del ecosistema y entorno ambiental del aeropuerto, posibles afectaciones sobre la fauna y flora, análisis de las capacidades operativas de las nuevas pistas y terminales, valoración de las inversiones que se van a llevar a cabo y por último, todos aquellos informes que provengan de instituciones oficiales que apoyen el proyecto.

Por último, una vez se ha realizado todo el estudio enunciado anteriormente y aprobado mediante una Orden Ministerial del Ministerio de Fomento, se hace constar en el BOE su validez. Para la aprobación y formalidad, se realiza la diligencia por parte de la Dirección General de Aviación Civil del Ministerio de Fomento para dar por acabado todo el proceso previo para poder iniciar el calendario de actuación según el calendario previsto.

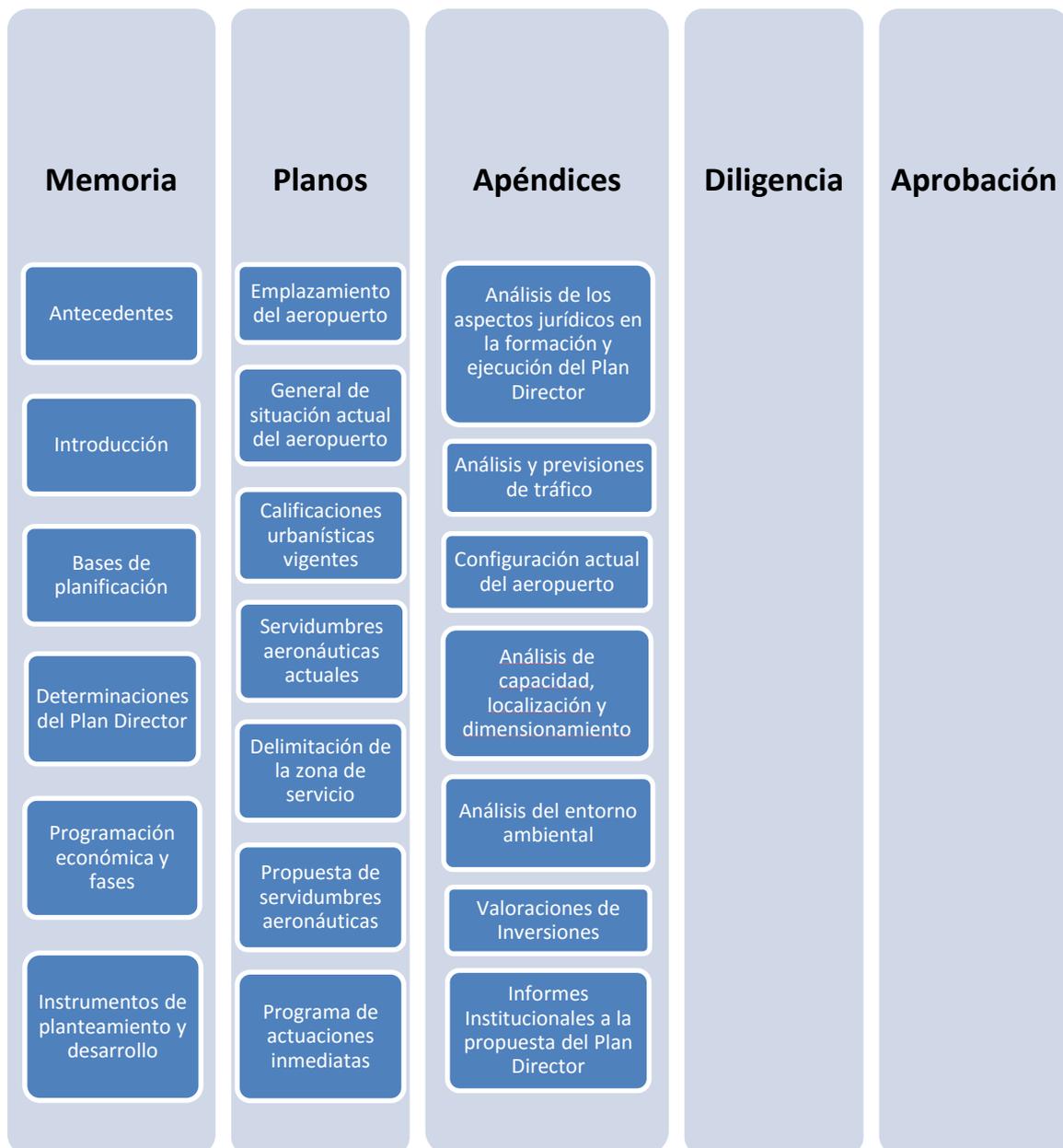


Figura 1.5 – Contenido del Plan Director Barcelona – El Prat 2003 y sus fases de izquierda a derecha (Elaboración propia)

En la figura 1.6, se puede ver cómo una predicción a largo plazo es muy incierta por tener mucha exposición a que acontezcan sucesos tanto económicos como sociales o políticos que hagan desviar la estimación. Durante los primeros años (1998-2002) se aprecia como lo predicho y lo registrado fue muy semejante. A partir de entonces, empezó a crecer a mayor ritmo el tráfico de pasajeros, lo que provocó una importante desviación que más adelante, en el período de la fuerte recesión económica (2007-2009) se reajustó. Aun así, en el 2011 alcanza de nuevo el nivel de desviación anterior y continúa con el fuerte crecimiento que no se contempló en la predicción.

Diferencia entre tráfico real y el estimado en el Plan Director del Aeropuerto de Barcelona (1999)

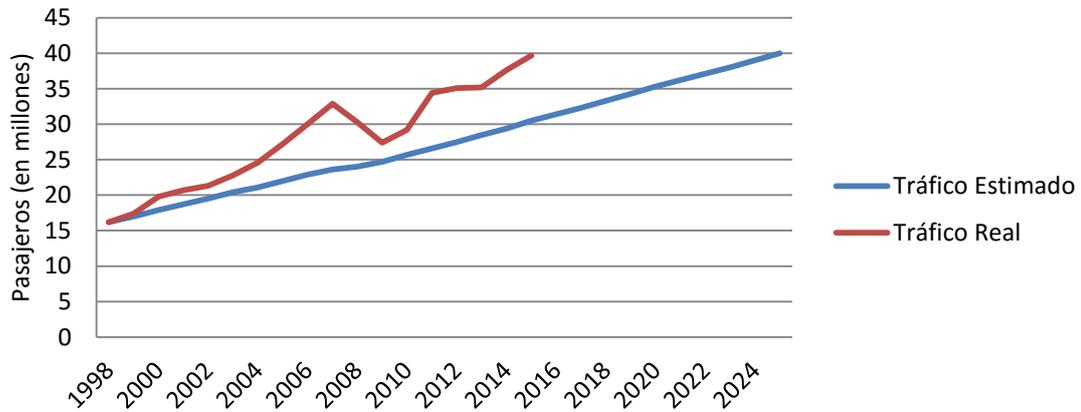


Figura 1.6. Diferencia entre tráfico real y el estimado en el Plan Director del Aeropuerto de Barcelona (1999) (Elaboración propia)

Para finalizar este punto, se muestra la figura 1.7 realizada por *Aena* en el mismo Plan Director, en la que mostraron una previsión del tráfico comercial de aeronaves del 1998 al 2010. Como sucedería de igual forma, realizó el cálculo para 3 posibles escenarios y así reducir la incertidumbre. Primero obtuvo el escenario previsto, con una afectación por la puesta en servicio del AVE de Barcelona – Madrid. Una vez partiendo de la predicción realizó dos posibles escenarios: el escenario optimista y el pesimista. En el escenario optimista se tiene en cuenta todos los datos favorables para el crecimiento de la actividad económica del aeropuerto, mientras que en el pesimista sucede al contrario.

Tal y como se puede consultar en el histórico de *Aena* del 2010 [AENA 2010], el tráfico de aeronaves en el año 2010 fue de 277.832 aeronaves. El tráfico de ese año estuvo dentro de lo esperado por el organismo en la zona inferior a la previsión (pesimista), a 60.000 aeronaves del escenario estimado.

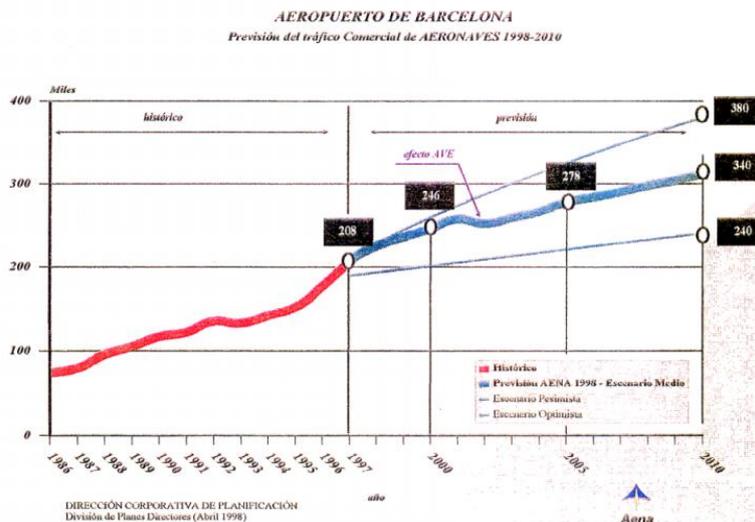


Figura 1.7. Registro del tráfico de aeronaves en el Aeropuerto de Barcelona – El Prat del 1986 al 1997 y la previsión hasta el 2010 en el Plan Director (1999)

1.3.2. Planificación a corto y medio plazo – Optimización de la capacidad existente

A diferencia de lo explicado en la sección anterior (ver punto 1.3.1), una planificación a corto y medio plazo nunca excede del año. Este punto es especialmente relevante, teniendo en cuenta que la predicción que se realiza en la tesis es a corto/medio plazo. A continuación se detalla la diferencia entre ellas.

Una planificación a corto plazo es la correspondiente al período que no puede superar los 3 meses de duración. Por poner un ejemplo, *Eurocontrol* realizó gracias a un ensayo experimental compuesto por miembros de *Aena* de la planificación de redes de colaboración y planificación de aeropuertos de tres meses de octubre del 2008 [AENA 2008].

Muy similar al corto plazo, es la planificación a medio plazo, en la que para poder realizarse es necesario que el período sea un poco más extenso, de entre 3-5 meses hasta el año de duración. Para saber distinguir un corto plazo de un medio plazo, lo diferenciaríamos de la siguiente forma: todo lo que no suponga un tiempo necesario para su puesta en marcha, como por ejemplo la contratación de más personal de seguridad, se consideraría de medio plazo. En cambio, si por el contrario se busca instalar más accesos y así agilizar el filtro de seguridad estaríamos hablando de medidas a medio plazo.

Las medidas anteriormente mencionadas para mejorar el acceso de los pasajeros, son inferiores a un año. En cambio, si se desea construir un edificio anexo a la terminal para separar el tráfico *Schengen* del tráfico *No Schengen*, se estaría considerando medidas de planificación a largo plazo, puesto que su construcción supondrá un año o más.

Las medidas principales que se recogen para mejorar la demanda están contempladas también en el documento realizado por el Instituto Mexicano del Transporte [Herrera 2006: 17] y se pueden dividir en dos propuestas: las económicas y las administrativas.

Como medidas económicas se contempla la tarificación en períodos de máxima demanda con un aumento de precios, para que las compañías principalmente *low cost*, valoren realizar sus vuelos en horas valle. No necesariamente debe imponerse el precio de volar en esa franja, la segunda propuesta es la subasta del servicio, en la que la que más pujan podrá operar en ese lapso mientras que el resto deberán encontrar un slot acorde a sus capacidades económicas.

Por lo que representan las medidas administrativas, intentan no ser tan capitalistas, y su objetivo es limitar el tráfico a las aerolíneas en general. Por ejemplo, repartir menor cantidad de slots en horas punta, controlar el flujo del tráfico aéreo mediante regulaciones o restringir las operaciones a únicamente las de carácter comercial. Por ese motivo, el tráfico de mercancías suele operar con vuelos nocturnos.

Como aparece en la página 6 del listado de las Tarifas de *Aena* 2015 [AENA 2015], también se impone una cuantía mínima por operación en función del aeropuerto. La finalidad de esta medida es liberar al aeropuerto del tráfico de aviones ligeros para que estos operen en Sabadell, como sería el caso. Como el importe a abonar va en función del peso de la aeronave, las avionetas apenas generarían volumen de pasajeros a las instalaciones, pero sí ocuparían la zona de operaciones.

Otra medida muy extendida que se lleva a cabo en los aeropuertos es la de intentar incrementar las horas valle y homogeneizar el número de operaciones/hora en el aeropuerto a lo largo del transcurso del día (ver figura 1.8). De esa forma, gracias a que los pasajeros viajan en franjas más repartidas, es menos probable que se produzcan retrasos por congestión del tráfico aéreo, filtros de seguridad y accesos entre otros puntos.

En la presente tesis se intentará mediante las técnicas de análisis metodológicas, prever el tráfico de pasajeros para el aeropuerto en cuestión, utilizando soluciones de corto/medio plazo. Es decir, las mencionadas en el presente punto.

Capacidad Global del aeropuerto de Barcelona

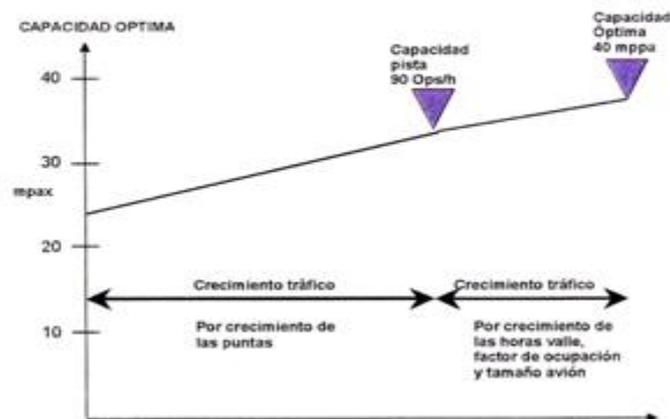


Figura 1.8 – Gráfico de la capacidad global del aeropuerto con el crecimiento de las horas punta y seguidamente de las horas valle.

2. ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS DESTINADAS A PREVISIÓN DEL TRÁFICO DE PASAJEROS EN AEROPUERTOS

Para poder realizar la predicción de cualquier aspecto con precisión y un bajo margen de error, es necesario disponer de gran cantidad de información diversa. Como no podía ser de otra forma, para predecir el tráfico de un aeropuerto también es un requisito indispensable disponer de grandes fuentes de información. Si se observa lo dinámico y sensible que es el sector de la aviación, se puede ver que en efecto, obtener una estimación que se cumpla a la perfección es tarea compleja. Por esa razón, todos los parámetros que se consideran influyentes deben ser tomados en cuenta en el modelo, tanto de tipo económicos como el PIB, IPC... los sociales, nivel de terrorismo, meteorología en la región, etc.

Como se menciona en el libro *Airport systems: Planning, design and management* [De Neufville y Odoni 2013], las predicciones a largo plazo no suelen ser muy acertadas. Antigamente cuando los gobiernos regulaban la competencia del sector aéreo, las variaciones y crecimientos de éste eran muy predecibles. Desde su liberalización, se han tenido que buscar otras metodologías para poder pronosticar aspectos como las operaciones o el tráfico de pasajeros. Para los autores de la referencia mencionada anteriormente no tomar como válidas las predicciones a largo plazo es lo correcto por tratarse de irrealistas e irresponsables. Irrealista porque el entorno es muy innovador y competitivo haciendo grandes variaciones, e irresponsable porque si tomamos como válida la predicción obtenida, estaremos asumiendo grandes márgenes de error.

Los organismos y entidades encargadas de realizar estudios y guías para obtener soluciones lo más fieles a la realidad son de carácter internacional. Algunos entes, como ICAO o IATA se encargan de realizar informes [ICAO 2006] para ayudar en mayor medida a todas las empresas del sector a poder realizar sus previsiones, y así cumplir su misión: el crecimiento del sector aeronáutico de forma sostenible y controlada.

Las distintas metodologías que se pueden emplear para realizar la previsión de tráfico de pasajeros pueden ser múltiples. Generalmente los modelos de predicción se pueden dividir en tres grandes categorías que se detallarán en la sección 2.1: la cualitativa o crítica, la cuantitativa o matemática y el análisis de decisiones.

En este trabajo, se tomará como variable dependiente el tráfico de pasajeros del aeropuerto del aeropuerto de Barcelona – El Prat, con tal de ver qué valor obtiene el programa de predicción con el menor margen de error posible. Se cogerá como período el medio plazo, para no encontrar márgenes de error muy elevados y evitar soluciones erróneas que no se ajusten en un futuro.

2.1. Métodos de predicción: visión general

Tal y como aparece en el apartado 2, para realizar predicciones encontramos diferentes métodos, los cuales se pueden dividir en cuantitativos, cualitativos y análisis de decisiones. Los métodos cuantitativos son de utilidad cuando se dispone de variables con información numérica, y por lo tanto cuantificables. En los siguientes apartados se entrará más en detalle con este método, por ser el escogido para el caso de estudio.

Para tener una idea general, los modelos cualitativos se emplean en situaciones en que los datos para realizar la predicción son descriptivos [López y Sandoval 2006], e incluso cuando no son suficientes y no se pueden llegar a obtener. En cambio, los modelos cuantitativos se emplean cuando se dispone de observaciones históricas que presentan todos los datos necesarios para la predicción. Por último, el análisis de decisiones se utiliza como una combinación de los dos métodos mencionados anteriormente. Es decir, se realiza mediante una gran fuente de datos pero a juicio del analista que está realizando la predicción mediante técnicas estadísticas y matemáticas con probabilidades, siendo de utilidad para evaluar posibles riesgos e incertidumbres.

Sea cual sea el método escogido, la efectividad de éste se evaluará en función de tres características: precisión, sensibilidad y objetividad. Para cualquier error en la previsión podrá ocasionar un escenario que no se había contemplado, por lo que reducir el margen de error es trascendental. El período de la muestra debe ser lo suficientemente significativo para que sea capaz de predecir cambios de tendencias. Por último, la validez de la información debe ser el factor más importante, puesto que si disponemos de información corrupta o incompleta el resultado no será el que se debería de esperar.

Tal y como se muestra en la figura 2.1, así quedarían distribuidas las técnicas y métodos según el modelo de predicción utilizado y la técnica. Este trabajo pretende realizar una predicción siguiendo un modelo predictivo cuantitativo utilizando métodos causales, por lo que se hará hincapié en esa rama. De esa forma, se ha requerido de la búsqueda de gran cantidad de información recogida en meses para la realización del capítulo 3. Ese gran listado de datos, como se verá en dicho apartado, proporcionará la información histórica al modelo para poder realizar su entrenamiento y posterior testeo para calcular la precisión en la previsión obtenida.

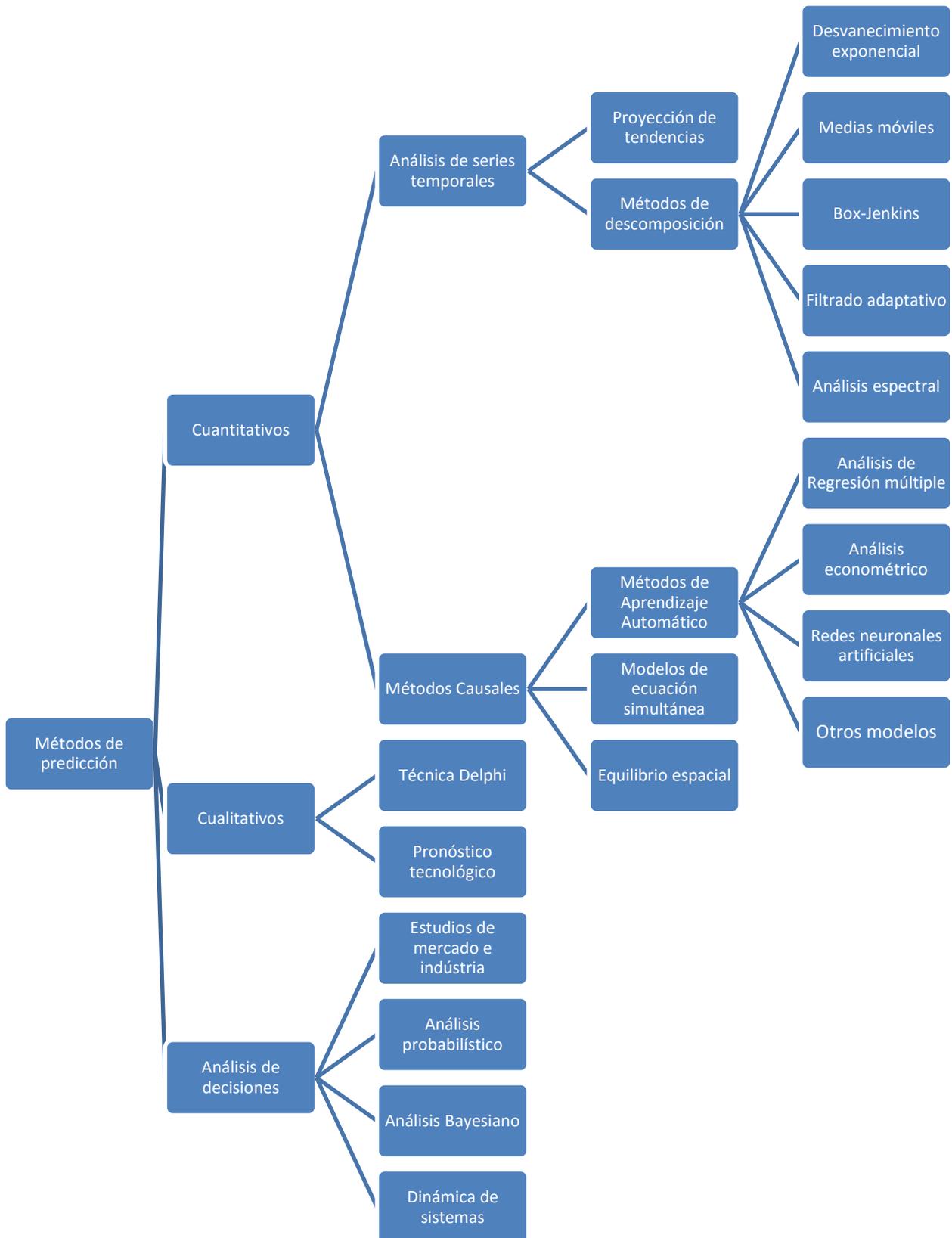


Figura 2.1 – Clasificación de los diferentes métodos de predicción (Elaboración propia)

2.2. Métodos Cuantitativos: Análisis de series temporales

Como se aprecia en la figura 2.1, las técnicas predictivas que engloban los modelos cuantitativos son dos: los análisis de series temporales y los métodos causales. El análisis de series temporales se centra en el uso de datos históricos para poder describir el comportamiento de la muestra observada, prever la evolución de esa muestra en un período futuro y contrastarla con alguna teoría que reafirme ese comportamiento. Disponer de todos los datos recogidos equidistantes en el tiempo y ordenados es sumamente importante. La representación de los modelos de esta categoría son mediante un gráfico en el cual el eje de abscisas u horizontal se encuentra la variable independiente que es el tiempo, y el eje de ordenadas o vertical la variable a predecir.

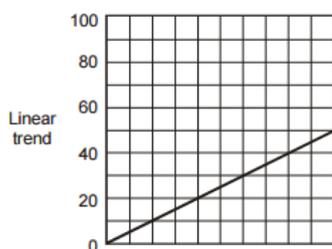
En los siguientes subapartados se encuentran a grandes rasgos las características que definen cada técnica, las peculiaridades como también su uso.

2.2.1. Proyección de tendencias

Para realizar un análisis de series temporales, aparecen dos subcategorías, la proyección de tendencias y los métodos de descomposición. La proyección de tendencias es aquella técnica que permite predecir el tráfico aéreo mediante datos históricos para encontrar una tendencia que posea el tráfico. Normalmente se emplea para el medio a largo plazo sin tener en cuenta las fluctuaciones del tráfico para el resultado. La operación que realiza es muy sencilla: deriva el tiempo de la muestra por extrapolación obteniendo un resultado con el mismo crecimiento que la evolución histórica. Esta técnica deja de ser útil cuando la estabilidad y la correlación de los datos históricos son débiles, obteniendo por tanto un pronóstico con confianza baja.

Para el cálculo de esta proyección se emplean técnicas matemáticas para definir la mejor línea que se ajuste a los datos introducidos. Cuanto más sofisticada sea el método de proyección, las matemáticas que impliquen también lo serán. Como curvas de tendencia encontramos cuatro según se requiera para el modelo en cuestión:

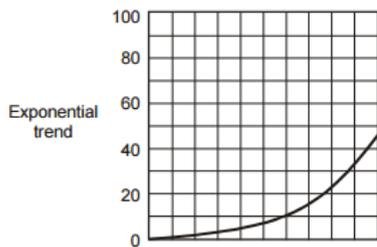
- **Lineal:** incremento constante de b en el tráfico y disminución de la tasa de crecimiento de forma lineal (crecimiento o disminución constante)



$$Y = a + bT$$

Figura 2.2 – Representación lineal de una proyección de tendencias

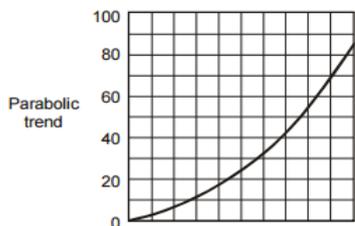
- **Exponencial:** obtención de la muestra en forma exponencial, para valores de b positivos y menores de 1, implica un incremento del tráfico anual de 100 b .



$$Y = a(1 + b)^T$$

Figura 2.3 – Representación exponencial de una proyección de tendencias

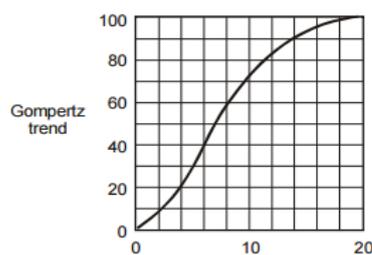
- **Parabólica:** representación de la muestra con tendencia a una forma parabólica pudiendo ser cóncava o convexa



$$Y = a + bT + cT^2$$

Figura 2.4 – Representación parabólica de una proyección de tendencias

- **Gompertz:** representación de una muestra que cuando se aproxima a un nivel de saturación a cambia de cóncava a convexa o viceversa. Útil para representar períodos de tiempo muy lejanos en los que el crecimiento se ve reducido por limitaciones de capacidad, por ejemplo.



$$Y = ab^{-c^T}$$

Figura 2.5 – Representación de *Gompertz* de una proyección de tendencias

Para acabar con la proyección de tendencias, añadir que la extrapolación gráfica muestra claramente una falta de criterios objetivos para utilizar la curva que mejor se adapte. Como se ha dicho, para el mundo aeronáutico actual, es bastante escueta pero un posible uso sería para encontrar valores que no se poseen del siglo pasado. Por ejemplo, para encontrar el tráfico del 1990 teniendo como datos históricos el período del 1960-1980.

2.2.2 Métodos de descomposición

Como el propio nombre indica, los métodos de descomposición se utilizan para diseccionar o dividir el problema en diferentes componentes. Una de las razones para tener muy presentes estos métodos es por ejemplo, para predecir períodos estacionales o cíclicos. A parte de obtener el resultado, se puede ver el grado de estacionalidad, del factor cíclico y como aparece en el apartado 2.2.1, el factor de la tendencia de la muestra.

En esta clase de métodos encontramos cinco técnicas diferentes de predicción, las cuales se explican muy brevemente a continuación debido a su relevancia dentro del marco teórico conjunto.

El desvanecimiento exponencial es una técnica que hace frente a fluctuaciones de un período determinado realizando una técnica llamada suavizado. Se puede conseguir efectuando la técnica de suavizado exponencial, o también las medias móviles. La diferencia está en que la primera técnica mencionada pone más énfasis en los datos más recientes que la otra técnica, por considerarse que el escenario reciente es más fiable de que se mantenga o varíe en menor proporción que el pasado.

La metodología Box-Jenkins es un tipo de modelo de la metodología autorregresivo y de medias móviles (ARMA) [Espasa 1978] (ayudan a capturar la dependencia temporal) para la obtención de soluciones con datos de carácter determinista, como es la estacionalidad, días laborables, fin de semana, etc. El modelo recogerá si hay una fuerte evolutividad de la tendencia como también estacional. Este modelo es muy apropiado para períodos de corto plazo, pero posee altos niveles de subjetividad, por lo que es necesario realizar diferentes predicciones para escoger la que posea el margen de error menor.

Las técnica de medias móviles es muy similar a la técnica de suavizado exponencial, con la diferencia de que no se da más relevancia a unas observaciones que a otras. La diferencia en la solución obtenida, es que queda más suavizada y es una técnica más simple. También se utiliza la metodología ARMA para mediante el error de la muestra anterior, ir definiendo la predicción con el mínimo error en el pronóstico.

El filtrado adaptativo es otro método de predicción, el cual tiene en cuenta los pesos de la muestra para cada período de tiempo. Primeramente realiza una predicción para el período más reciente, como podría ser el próximo año. Una vez obtenido, se repite nuevamente para ajustar los pesos y así reducir el error. La forma de distribuir esa importancia de los pesos es con el Error Cuadrático Medio (ECM), el cual mide el promedio de los errores del estimador a lo que se estima. Seguidamente se muestra la ecuación del predictor ECM, el cual \hat{Y}_t es el vector de n predicciones y Y_t es el vector de los verdaderos valores.

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_t - Y_t)^2$$

Por último, el análisis espectral es utilizado para explicar y calcular la variación cíclica de los datos, por ejemplo, temporada de invierno-verano-invierno, mediante curvas matemáticas complejas. Tales curvas se deben utilizar si existe un conocimiento anterior y exhaustivo del escenario o si hay indicios claros de que los datos demuestran claramente que ese escenario se recoge en el pronóstico.

2.3. Métodos Cuantitativos: Modelos Causales

Los métodos causales pretenden encontrar la interferencia entre causa y efecto de un escenario futuro en función de la tendencia pasada, es decir, extrapolan los datos recogidos en el pasado, llamado histórico, para prever el futuro. La peculiaridad es que se modifica la tasa de crecimiento para contemplar posibles perturbaciones, como lo acontecido para las olimpiadas de Barcelona, y obtener tendencias subyacentes a raíz de estos cambios conocidos.

Por el contrario, a largo plazo los métodos causales son poco fiables puesto que aparte de los motivos que expone De Neufville en su libro [De Neufville y Odoni 2013] mencionado anteriormente en el apartado 2.2, no podemos contemplar todas las posibles perturbaciones que en un futuro puedan influir en el resultado final. De lo contrario, estaríamos asumiendo elevados márgenes de error haciendo inviable tener en consideración esa previsión.

Para encontrar una correlación de las variables y poder predecir la demanda, se observa si hay una relación dependiente significativa entre las variables y la posición en la que se encuentran. Cuanta menos dispersión tengan las variables, menor será el error asumido, reduciendo la incertidumbre de obtener un resultado inesperado.

Como ejemplo, uno de los métodos de Aprendizaje Automático son las redes neuronales, las cuales pueden ser estudiadas [Mitreá, Lee y Wu 2009] siguiendo técnicas de predicción como lo son los métodos causales o los análisis de series temporales vistos en el apartado 2.2. Según investigadores de la Universidad Tecnológica de Singapur, pudieron concluir que a mayor número de muestras de las variables, más fiable y precisa será la predicción. Por ello, aconsejan tener un muestreo elevado como se realiza en esta tesis en la que las variables han sido recogidas en datos mensuales, en vez de anuales. De esta forma, se tiene un seguimiento mucho más preciso de la evolución de las diferentes variables.

2.3.1. Métodos de Aprendizaje Automático

Los métodos de Aprendizaje Automático son técnicas que mediante un conjunto de pruebas de entrenamiento obtienen un modelo de las categorías en las que son los datos clasificados, con el propósito de que se pueda extrapolar para poder obtener de manera automática una analogía de patrones del propio modelo. Con ello, se puede llegar a obtener con éxito a una gran variedad de problemas y datos en tareas de predicción, aunque generalmente, cuanto mayor sea el período a prever de menor calidad será el resultado.

Este método de predicción es el más extendido y utilizado en las predicciones de aviación civil. En ella intervienen las variables dependientes, es decir, las que conocemos, y las independientes, las que queremos predecir. Por otro lado, también se utiliza para ver qué variables influyen en la variación de la variable independiente. Por ejemplo, en el caso del aeropuerto, utilizar el análisis de regresión sobre un período ya acontecido, puede ser de utilidad para ver en qué grado influiría el PIB o la climatología en el crecimiento del aeropuerto. De esta manera, se podrían definir los aspectos que se considerarían influyentes en el crecimiento y expansión del aeropuerto para tener en cuenta en un futuro.

2.3.1.1. Análisis de regresión Múltiple

Para entender cómo funciona el modelo de regresión lineal múltiple, a continuación se muestra la ecuación para aclarar qué papel tienen todas las variables y como se obtiene:

$$Y = \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_k \cdot X_k + U$$

Para calcular la variable dependiente o Y , en el presente caso es el tráfico de pasajeros, se necesita de una β correspondiente a la estimación de los coeficientes (parámetros desconocidos), X que representa las variables explicativas con diferentes relaciones de dependencia (variables dependientes) y U que incorpora el término de perturbación o error [Juan 2015].

Este tipo de análisis se utiliza frecuentemente por ejemplo, en biología. Si se desea estudiar una cualidad de un ser vivo, y se cree que esa cualidad puede estar relacionada con otras variables como la temperatura ambiental, o su estatura, sería necesario incluir esa información como variables independientes. De esa forma, se podrá ver si finalmente existe relación entre esas variables.

2.3.1.2. Análisis Econométrico

El análisis econométrico es un análisis de regresión múltiple con una estructura de precios e ingresos en modelos económicos. La base de este análisis es un modelo de regresión, el cual manifieste la relación entre una relación causal entre las variables dependientes y la o las variables explicativas. Es decir, este análisis sería un caso concreto de un análisis de regresión aplicado al ámbito económico. Las variables dependientes podrían ser ingresos por pasajero y quilómetro transportado (*revenue passenger-kilometres* o *RPK*) o en el caso de mercancías toneladas por quilómetro transportado (*freight-tonne kilometres* o *FTK*).

Este tipo de análisis observa la evolución del tráfico aéreo en función de los cambios que se produzcan en las variables explicativas. Por ejemplo, este tipo de análisis sería interesante en cómo afectan las compañías de bajo coste una vez operan en un aeropuerto para definir el desarrollo económico de las instalaciones.

2.3.1.3. Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales son formas de computación inspiradas en modelos biológicos, como serían los seres humanos. Es decir, es un modelo matemático que está compuesto por una gran cantidad de elementos procesales todos ellos organizados en niveles para su posterior entrenamiento. Como si de una red neuronal humana se tratase, las redes neuronales artificiales están interconectadas masivamente entre ellas con conexiones en paralelo (y contemplar todas las combinaciones posibles), mediante una jerarquía para poder interactuar con los datos que se le proporciona.

Este tipo de redes ofrecen unas ventajas que el resto de métodos mencionados no son capaces de proporcionar:

- **Aprendizaje adaptativo:** las redes son capaces de entender ejemplos ilustrativos para llevar a cabo tareas similares. Durante el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas que unen las capas entre sí, tal y como se ve en la figura 2.6, se ajustan de tal forma para que se extraigan unos resultados específicos. En otras palabras, no necesita ni utiliza un algoritmo específico para obtener la solución. La red es capaz de generar la ponderación de los enlaces que conectarían la capa de entrada, la capa oculta y la capa de salida.
- **Auto-organización:** es capaz de reconocer cierta clase de patrones ayudando considerablemente cuando la información de entrada en ocasiones no está completa. Es muy útil para dar soluciones en escenarios que la información es incompleta.
- **Tolerancia a fallos:** debido a las características anteriores, las redes son capaces de funcionar con información incompleta o con ruido. Sorprendentemente, aunque se destruya parte de la red, ésta podrá seguir funcionando con los arcos restantes.
- **Operación a tiempo real:** puesto que funciona con conexiones en paralelo, esta característica le da cierta rapidez y agilidad, que en cambio no la tendrían el resto de redes. Es decir, es capaz de operar y realizar múltiples cambios de peso en las ponderaciones de los arcos de manera simultánea.

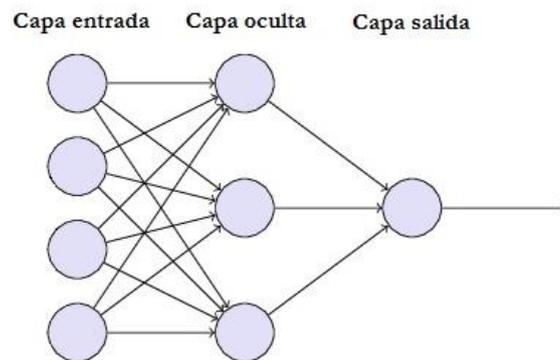


Figura 2.6 – Arquitectura de una Red Neuronal Artificial (Elaboración Propia)

Este tipo de modelos trabajan con grandes fuentes de información, pudiendo hablar de cientos de miles de datos almacenados para realizar el entrenamiento y la prueba del modelo. Como se puede apreciar en la figura 2.7, este sería el proceso que se realizaría para comparar y evaluar el modelo:

1. La fuente de datos recogida se separa en el conjunto de entrenamiento y el conjunto de validación y el modelo empieza a hacer sus predicciones y sus evaluaciones.
2. Una vez la evaluación del modelo está completada, es momento de comparar los resultados obtenidos con un fichero al que el modelo no ha tenido acceso en ningún momento para no condicionar el resultado final y se empieza a realizar el contraste de la información obtenida.
3. Finalmente, una vez se han comparado todos los parámetros y variables, el modelo saca su evaluación final de la previsión indicando el grado de precisión que ha tenido, la variable a prever real y la imaginada por el modelo.

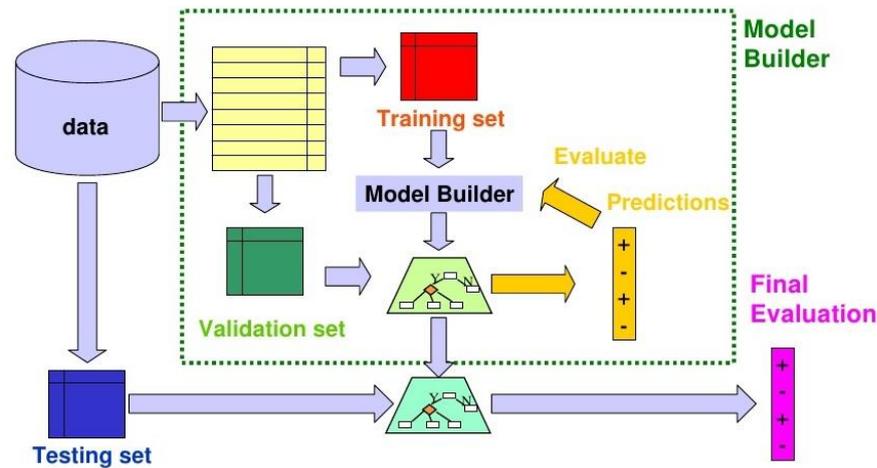


Figura 2.7 – Diagrama de flujo realizado por las Redes Neuronales Artificiales

2.3.2. Modelos de ecuaciones simultáneas

Como cabe de esperar, algunos escenarios particularmente económicos, requieren de modelos de más de una ecuación, puesto que es un requisito cumplir las variables con más igualdades. Por ejemplo, si la demanda del tráfico se expresa como una función del precio y el nivel de servicios ofrecidos, el segundo puede expresarse como una función de la demanda para poder ver los efectos que producirían cambios en el escenario. Es por esto, que para tener en cuenta ambas ecuaciones y ver su causalidad se utilizan los modelos de ecuaciones simultáneas.

Como todos los análisis de regresión, la forma funcional de cada ecuación es necesaria que sea determinada. Los valores de sus parámetros se tienen que estimar para poder ver la importancia simultánea de los resultados y la validez de la hipótesis estudiada. El hecho de utilizar este tipo de modelos hace que sea un poco más complejo su manejo por estar tratando con modelos matemáticos combinados. Pese a esa dificultad, resulta más sencillo obtener los valores de las variables explicativas, puesto que el propio modelo los proporciona.

No es correcto pensar que este modelo es mejor al de ecuación simple por ser más complejo. Hay escenarios que se adapta mejor al modelo de ecuación simple, mientras que para otros escenarios el modelo múltiple es más preciso. Por ejemplo, para calcular la oferta y demanda del sector aéreo si no variase la oferta ofrecida por las aerolíneas, con un modelo de ecuación simple sería lo correcto. Mientras que para entornos más cambiantes, se debería tener en cuenta los modelos de ecuaciones múltiples, por ejemplo, en función además de los costes de la compañía y de los asientos que dispone.

Como se puede ver en la figura 2.8, RPK son los pasajeros por kilómetro transportados y ASK son los asientos ofrecidos por kilómetro. El punto de equilibrio entre oferta y demanda es el x_1, y_1 donde se cruza la curva de la oferta (S) y la curva de la demanda (D). A pesar que el escenario óptimo es el que se encuentra en el punto de equilibrio, en temporada alta especialmente, no todo el mundo puede viajar por lo que encontramos una parte del mercado sombreada de color gris que no podrá viajar. En algunas compañías se

realiza la sobreventa confiando que habrá pasaje que no se presente (*No Show*), aunque cuando esto no sucede, hay problemas de capacidad u *overbooking*.

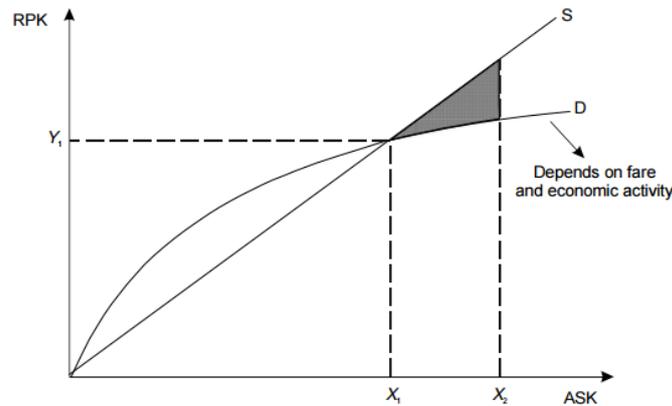


Figura 2.8 – Situación de la oferta – demanda en el sector aéreo

En ningún caso es deseable que crezca descontroladamente la oferta o la demanda. Puede darse la situación que las compañías aéreas reduzcan el precio de sus asientos, desviando la curva de la demanda para abarcar a más viajeros. Esta desviación puede hacer que las predicciones realizadas no se ajusten, originando problemas de capacidad del aeropuerto. Podría darse el caso de que generase problemas en la operativa de las aerolíneas, teniendo que realizar mayores esfuerzos para adaptarse al mercado y asumiendo riesgos operacionales como económicos.

2.3.3. Modelos de equilibrio espacial

Para acabar como modelo causal, se encuentra el modelo de equilibrio espacial. La finalidad de es medir el impacto entre centros de tráfico o regiones para movimientos de aeronaves. La principal característica de este modelo es ver la relación que existe entre dos regiones y cómo el tamaño de las regiones influye entre ellas, viendo la influencia en la distancia.

El cálculo se realiza mediante una distribución logística de cada mercado y un programa de maximización matemática. Según OACI, para encontrar modelos de demanda entre pares de ciudades, el modelo básico sería el siguiente:

$$D_{AB} = f(C, P_A, P_B, S_{AB})$$

Se define D_{AB} como la demanda entre las ciudades A y B, C es la constante de proporcionalidad, P_A es la población en la ciudad A, P_B es la población en la ciudad B y S_{AB} es la distancia entre las dos ciudades.

Se puede extrapolar el modelo a lo siguiente: a más población en las ciudades, más tráfico entre ellas, pero cuanto más lejos se encuentren entre ellas, menos tráfico dispondrán. Por poner un ejemplo, si se duplica la población de ambas ciudades, la demanda crecerá en cuatro veces, debido a la simplicidad del modelo de gravedad. Es cierto, que existen modelos más perfeccionados teniendo en cuenta la tarifa aérea, el tiempo o qué porcentaje de la población se encuentra por encima de un nivel de ingresos que le permita utilizar el transporte.

3. CASO DE ESTUDIO: PREDICCIÓN DEL AEROPUERTO DE BARCELONA – EL PRAT

3.1. Descripción general del caso de estudio

En la presente tesis se pretende realizar una predicción para el aeropuerto de Barcelona a medio plazo para poder encontrar la tendencia de crecimiento en los próximos 4-5 meses. Para encontrar este cálculo es necesaria una gran cantidad de datos (*Big Data*) con tal de que la información sea lo más fiable y con el mínimo margen de error para poder paliar el crecimiento, en caso de que exista, sin tener que realizar grandes inversiones debido a su largo proceso de construcción.

Todas las infraestructuras que encontramos a nuestro alrededor, y más en detalle los aeropuertos, son elementos arquitectónicos que forman parte de todo el tejido de desarrollo industrial. Las características que los definen son de instalaciones de grandes dimensiones con costes de construcción muy elevados y con impactos económicos y medioambientales sumamente importantes.

Como no podía ser de otra forma, la inversión de capital para su construcción como es en el caso del aeropuerto de Barcelona – El Prat requiere de inversiones por parte de diversos organismos: Ministerio de Fomento y Generalitat de Catalunya principalmente. El Ministerio de Fomento al ser el propietario de las instalaciones se encarga de todo lo relacionado con su construcción y mantenimiento, mientras que la Generalitat de Catalunya tendría el resto de competencias relacionadas con los alrededores, o los accesos por carretera o transporte público como sería la línea L9Sud de metro.

La red de conexiones con el aeropuerto, como también el lugar donde se encuentra ubicado deben ser lo más adecuado posibles. La multimodalidad en el transporte es muy importante, como también los terrenos adyacentes marcarán el grado de desarrollo de las instalaciones aeroportuarias como del tejido económico que se generará de su actividad. En El Prat, todo el parque empresarial Mas Blau y Mas Blau II se ha generado por la constante y creciente actividad que produce el aeropuerto en la región.

La confianza que los pasajeros muestran al transporte aéreo es muy volátil como con el accidente de *Spanair* en el Aeropuerto de Madrid – Barajas, puesto a que en el caso de que acontezca un suceso trágico, la demanda se resiente de manera importante, y los pasajeros se vuelven reacios a utilizar el avión como medio de transporte. El otro factor que es muy relevante es el grado de confianza que muestran los pasajeros en el transporte. Los pasajeros pueden o no tener transportes alternativos y pueden o no viajar por necesidad. En todos los casos, el grado de satisfacción debe ser para el pasajero lo mayor posible para que sea fiel al transporte y siga volando desde el aeropuerto en cuestión.

Pongamos un ejemplo del aeropuerto estudiado: imaginemos, como está pasando en la actualidad en los meses de veranos en el aeropuerto de Barcelona – El Prat, que debido a malas predicciones y aspectos muy difíciles de predecir como la meteorología adversa o el cierre temporal de otros aeropuertos, es necesario realizar regulaciones por capacidad en el aeropuerto o en la zona del aeródromo [Hosteltour 2016]. Esto generará una cascada de retrasos para todas las compañías que operan en el aeropuerto, dando una mala imagen a los pasajeros de la puntualidad del transporte, reduciendo la calidad del servicio al final.

En el ejemplo anterior, deberían haberse tomado medidas correctivas para reducir los vuelos regulados y así no tener que retrasar la salida o llegada de los vuelos por cuestiones operativas. La solución a la que se intenta llegar con la presente tesis es la siguiente: si se puede hacer una aproximación fiable con la demanda a corto y medio plazo, puesto que como se argumenta en el capítulo 2 es más fiable que la de largo plazo [De Neufville y Odoni 2013], se podrán tomar medidas que más adelante se verán para medio plazo poder reducir esos retrasos. Con ello, se evitará congestionar la capacidad de la terminal por los pasajeros de los siguientes vuelos retrasados que esperan a la llegada de su avión, ni del lado aire con los aviones haciendo largos tiempos de *taxi*, para poder despegar.

3.2. Obtención de datos y contraste

Una de las tareas más complejas de la predicción de la demanda es saber qué variables influyen sobre ésta. Es decir, sobre qué indicadores la demanda se ve afectada tanto de forma positiva como de negativa con una variación por pequeña que sea. Como cabe de esperar, ese no es considerado uno de los elementos más complicados para realizar una buena predicción. La tarea más compleja a nivel de recursos, es la obtención de los datos a lo largo de un período con bastantes muestras, podría ser de carácter mensual, y con datos reales y fidedignos a lo que esa variable recoge en el tiempo en cuestión.

La causa que da ese grado de complejidad para obtener los datos es debido a que no todas las fuentes de información públicas facilitan esa información, por lo que requiere de un contraste para descartar datos erróneos. Por ejemplo, *Aena* únicamente muestra el tráfico de pasajeros, las operaciones realizadas y las mercancías transportadas a partir del año 2004. Para disponer de datos anteriores, sería necesario realizar una petición a la entidad para conocer si dispone de esa información y es posible su difusión. En este caso, se quiere demostrar como con la información facilitada al alcance de la sociedad es suficiente para encontrar buenos modelos predictivos.

Por otro lado, otro problema que se origina es que no todas las variables se recogen en los mismos períodos. Es decir, puede darse el caso de que una variable esté recogida mensualmente como el tráfico de pasajeros o el IPC, mientras que por ejemplo el PIB sea de carácter trimestral o incluso anual como sucede con el índice de terrorismo. Este hecho puede perjudicar al resultado final, por lo que es recomendable disponer de todas las variables con la misma frecuencia de muestreo. Como es posible que ni los organismos encargados no posean de esa información, como sería el ejemplo del PIB de un país que se recoge cada trimestre, una solución es tomar para cada uno de los meses que componen el trimestre, el valor que ha tenido en ese período.

Como breve resumen, la fuente de datos utilizada está compuesta por 144 meses que transcurren desde enero del 2004 hasta diciembre del 2015 situados cada uno en su fila ordenados cronológicamente de forma ascendente. En las columnas del fichero se encuentran las 18 variables mostradas en la tabla 3.1, formando en su conjunto el archivo utilizado para el entrenamiento y prueba del modelo con 2.592 cifras en conjunto.

Tabla 3.1 – Descripción de las variables utilizadas en el modelo predictivo (Elaboración Propia)

| Variables | Explicación | Unidades | Periodo de muestreo | Fuente de referencia |
|---------------------------------|---|-----------------------|---------------------|--|
| PAX BCN | Número de pasajeros que han viajado en el aeropuerto de Barcelona – El Prat. Se contabilizan por vuelo realizado, es decir, un pasajero que realice la ida y vuelta desde este aeropuerto contabilizará doble, como los que hacen escala. | Número de pasajeros | Mensual | AENA [2016b] |
| OPS BCN | Número de operaciones realizadas en el aeropuerto de Barcelona – El Prat en términos absolutos. Refleja todo tipo de aeronaves tanto de pasajeros como de mercancías. | Número de operaciones | Mensual | AENA [2016b] |
| Ranking PAX BCN | Posición en la que ocupa el aeropuerto de Barcelona – El Prat a nivel estatal para indicar la importancia dentro del mercado nacional. | Posición del ranking | Mensual | AENA [2016b] |
| Total PAX SPAIN | Número de pasajeros que han viajado por toda la red de aeropuertos españoles de la red de AENA. Se contabilizan por vuelo realizado, es decir, contará el tráfico de cada aeropuerto español para obtener la suma conjunta. | Número de pasajeros | Mensual | AENA [2016b] |
| Total OPS SPAIN | Número de operaciones realizadas en el conjunto de aeropuertos españoles de la red de AENA – El Prat en términos absolutos. Refleja todo tipo de aeronaves tanto de pasajeros como de mercancías. | Número de operaciones | Mensual | AENA [2016b] |
| GDP per capita | Parte proporcional del Producto Interior Bruto de España (riqueza de España) dividida entre todos sus habitantes, para encontrar una representación del grado de desarrollo. | €/habitante | Trimestral | <i>Expansión</i> [2016] |
| Activity Rate SPAIN | Porcentaje de la ocupación en la población de España. | Porcentaje | Trimestral | Instituto Nacional de Estadística [2016a] |
| Unemployment rate SPAIN | Porcentaje de la población que se encuentra desempleada y está registrada conforme está buscando empleo. | Porcentaje | Trimestral | Instituto Nacional de Estadística [2016b] |
| Euribor | Es el índice de referencia que muestra el tipo de interés europeo promedio que ofrecen las entidades financieras en el mercado interbancario del euro. | Porcentaje | Mensual | European Central Bank [2016] |
| U.S. Gulf Coast Kerosene | Precio del barril U.S. Gulf Coast de queroseno utilizado en aviación. | USD (\$) por Galón | Mensual | Indexmundi [2016] |
| World Aviation Accidents | Registro de los accidentes acontecidos en todo tipo de aeronaves. Refleja todo tipo de tamaño de aeronaves. | Número de accidentes | Mensual | Junta Nacional de Seguridad del Transporte (NTSB) [2016] |

| | | | | |
|--------------------------------|--|---|---------|--|
| Global Aviation Deaths | Registro de víctimas mortales en todo tipo de aeronaves. Agrupa las víctimas sin importar el tamaño de la aeronave y si llevaba pasaje a bordo. | Número de víctimas mortales | Mensual | National Transportation Safety Board (NTSB) [2016] |
| CPI Catalonia | Índice de Precios al Consumo de Catalunya. Mide el precio de un conjunto de productos que se consideran de primera necesidad e indica el gasto para llevar un nivel de vida normal. A mayor aumento del índice, más se encarecen los productos y por lo tanto, menos calidad de vida con el mismo salario. | Índice | Mensual | Instituto Nacional de Estadística [2016b] |
| Terrorism Index SPAIN | Índice realizado por el Instituto de Economía y Paz (IEP) con sede en Nueva York que muestra el grado de terrorismo en España. Cuanto más bajo es el valor, quiere decir que se encuentra entre los países con más influencias terroristas. | Posición en el ranking de países con mayor terrorismo | Anual | Institute for Economics & Peace: Vision of Humanity [2014, 2015] |
| Average Temperature BCN | Temperatura media mensual recogida por el Observatori Fabra situado en Barcelona | Temperatura en Celsius (°C) | Mensual | Observatori Fabra [2016] |
| Rainfall BCN | Precipitaciones mensuales recogidas por el Observatori Fabra situado en Barcelona | Precipitaciones en mm | Mensual | Observatori Fabra [2016] |
| YEAR | Año de la muestra de la información de las variables. Las observaciones van del año 2004 al 2015. | Año | Anual | - |
| MONTH | Mes de la muestra de la variable en valor numérico del 1 al 12. | Mes | Mensual | - |

En la figura 3.1 se puede ver un fragmento del fichero Excel con la distribución de los datos, utilizando la última columna para la variable a prever, en el presente caso, el tráfico de pasajeros en el aeropuerto de Barcelona – El Prat (PAX BCN). A su izquierda, le acompañan todo el resto de variables que se anuncian y detallan en la figura 3.2.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | |
|----|---------|---------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------|---------|---------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|
| 1 | PAX BCN | OPS BCN | Ranking PAX | Total PAX SP | Total OPS SP | GDP per capi | Activity Rate | Unempoyer | Euribor | US Gulf | Coas | World Aviati | CPI Cataloni | Terrorism In | Average Tern | Rainfall BCN | YEAR |
| 2 | 1502099 | 21994 | 2 | 9979352 | 144227 | 4800 | 56.24 | 11.5 | 20895.0 | 1.0 | 110 | 48 | 80.174 | 7 | 9.4 | 2.6 | |
| 3 | 1697096 | 21634 | 2 | 11008703 | 143416 | 4800 | 56.24 | 11.5 | 20706.0 | 0.93 | 128 | 93 | 80.18 | 7 | 8.6 | 107.1 | |
| 4 | 1958778 | 24159 | 2 | 12434592 | 162238 | 4800 | 56.24 | 11.5 | 20288.0 | 0.95 | 126 | 49 | 80.709 | 7 | 10.0 | 68.2 | |
| 5 | 2047100 | 23819 | 2 | 13288475 | 168009 | 4900 | 56.55 | 11.09 | 20488.0 | 0.97 | 154 | 41 | 81.833 | 7 | 12.8 | 128.9 | |
| 6 | 2144105 | 25201 | 2 | 14325785 | 181075 | 4900 | 56.55 | 11.09 | 20859.0 | 1.09 | 189 | 84 | 82.314 | 7 | 16.2 | 36.6 | |
| 7 | 2219267 | 25154 | 3 | 15283863 | 185119 | 4900 | 56.55 | 11.09 | 21127.0 | 1.03 | 183 | 71 | 82.484 | 7 | 22.4 | 14.5 | |
| 8 | 2395852 | 26569 | 3 | 17260463 | 199850 | 5000 | 56.93 | 10.74 | 21160.0 | 1.15 | 231 | 76 | 81.928 | 7 | 23.5 | 32.1 | |
| 9 | 2523870 | 26029 | 3 | 18382505 | 197591 | 5000 | 56.93 | 10.74 | 21143.0 | 1.23 | 216 | 106 | 82.401 | 7 | 25.1 | 12.0 | |
| 10 | 2281398 | 25585 | 3 | 16210223 | 185261 | 5000 | 56.93 | 10.74 | 21186.0 | 1.36 | 194 | 89 | 82.469 | 7 | 21.4 | 71.1 | |
| 11 | 2203679 | 25063 | 2 | 15244029 | 179356 | 5000 | 57.12 | 10.53 | 21473.0 | 1.52 | 173 | 103 | 83.307 | 7 | 18.9 | 27.9 | |
| 12 | 1860314 | 23665 | 2 | 11569002 | 159341 | 5000 | 57.12 | 10.53 | 21703.0 | 1.35 | 127 | 143 | 83.532 | 7 | 11.4 | 9.8 | |
| 13 | 1724580 | 22497 | 2 | 11159230 | 151476 | 5000 | 57.12 | 10.53 | 21732.0 | 1.22 | 121 | 74 | 83.551 | 7 | 9.3 | 77.6 | |
| 14 | 1634516 | 22873 | 2 | 10939703 | 155447 | 5100 | 57.38 | 10.17 | 21454.0 | 1.33 | 117 | 63 | 83.063 | 10 | 7.2 | 0.0 | |
| 15 | 1781141 | 22420 | 2 | 11313030 | 150199 | 5100 | 57.38 | 10.17 | 21384.0 | 1.33 | 111 | 185 | 83.22 | 10 | 6.5 | 55.6 | |
| 16 | 2176777 | 25114 | 2 | 13940519 | 173879 | 5100 | 57.38 | 10.17 | 21372.0 | 1.56 | 150 | 50 | 83.904 | 10 | 10.2 | 18.3 | |
| 17 | 2210128 | 25402 | 2 | 13994505 | 179830 | 5200 | 57.86 | 9.32 | 21372.0 | 1.57 | 160 | 39 | 85.109 | 10 | 14.0 | 14.1 | |
| 18 | 2441316 | 26970 | 2 | 15918699 | 198129 | 5200 | 57.86 | 9.32 | 21256.0 | 1.47 | 202 | 81 | 85.317 | 10 | 18.8 | 33.3 | |
| 19 | 2455854 | 26894 | 2 | 16664908 | 201191 | 5200 | 57.86 | 9.32 | 21110.0 | 1.65 | 228 | 56 | 85.561 | 10 | 23.4 | 11.5 | |
| 20 | 2700549 | 28067 | 3 | 19262518 | 216739 | 5300 | 57.86 | 8.41 | 21194.0 | 1.67 | 231 | 98 | 85.128 | 10 | 24.4 | 7.8 | |
| 21 | 2803220 | 27162 | 3 | 19938456 | 214670 | 5300 | 57.86 | 8.41 | 21325.0 | 1.87 | 228 | 447 | 85.506 | 10 | 23.0 | 41.7 | |
| 22 | 2523756 | 26594 | 3 | 17833343 | 200618 | 5300 | 57.86 | 8.41 | 21391.0 | 2.23 | 191 | 235 | 85.996 | 10 | 20.7 | 105.6 | |
| 23 | 2436429 | 26499 | 2 | 16535216 | 189991 | 5400 | 58.08 | 8.71 | 21966.0 | 2.4 | 161 | 183 | 86.684 | 10 | 17.9 | 127.1 | |
| 24 | 2068085 | 25592 | 2 | 12799249 | 166312 | 5400 | 58.08 | 8.71 | 23609.0 | 1.7 | 121 | 65 | 86.845 | 10 | 11.1 | 140.3 | |
| 25 | 1920974 | 24224 | 2 | 12137495 | 163444 | 5400 | 58.08 | 8.71 | 24729.0 | 1.73 | 131 | 187 | 87.133 | 10 | 6.6 | 3.1 | |

Figura 3.1 – Distribución de las variables utilizadas en el fichero Excel del modelo predictivo (Elaboración Propia)

3.3. Predicción del tráfico de pasajeros del aeropuerto mediante **WEKA**

En esta sección se trata la parte más práctica de la tesis, en la cual se realizan las predicciones con el programa *WEKA* (acrónimo de *Waikato Environment for Knowledge Analysis*). Este programa está desarrollado por la Universidad de Waikato en Nueva Zelanda y es de código abierto bajo la Licencia Pública General de GNU. Este tipo de programas ofrecen ilimitadas funcionalidades, debido a que los usuarios pueden modificar partes del código de programación para ajustarlo a sus necesidades. La versión 3.8.0 del programa se puede obtener mediante su descarga *online* en el enlace que se muestra en las referencias [THE UNIVERSITY OF WAIKATO 2016].



Figura 3.2 – Icono de la herramienta de minería de datos *WEKA*

Poder disponer de una herramienta para analizar miles de datos, llamado minería de datos o *Big Data*, es de gran ayuda en especial para realizar análisis y predicciones. Utiliza el lenguaje de programación *Java* y sus principales herramientas son el procesamiento previo de datos, clasificación, regresión, agrupación (*clustering*), reglas de asociación, y visualización haciendo que sea uno de los programas de código libre más funcionales. Como se ha hecho mención, contiene un conjunto de paquetes de código abierto los cuales pueden ser utilizados en cualquier proyecto de análisis de datos.

Cabe destacar que las modificaciones que realizan los usuarios cuando desarrollan nuevos algoritmos, pueden ser compartidos con facilidad para contribuir como una gran comunidad científica. Esta utilidad, ayuda a avanzar y encontrar día tras día nuevas técnicas para encontrar resultados más fiables, poder analizar indicadores de las tendencias y patrones de los datos, etc. generando innumerables beneficios para la sociedad.

El capítulo está dividido en dos apartados: la preparación y preprocesado de los datos utilizados, y por otro lado la creación y la prueba del modelo predictivo. En la primera parte se detallarán los pasos realizados para ordenar la gran lista de datos recogida para encontrar la predicción. Es necesario que todos los datos estén correctamente recogidos en el fichero *data_processed* (adjunto en el CD-R de la memoria) en formato CSV y siguiendo unos estándares para garantizar la lectura e interpretación de éstos.

En el apartado 3.3.2. se escoge el modelo predictivo que más ajuste la predicción de la información introducida con el menor margen de error posible. También es imprescindible realizar diversas pruebas para determinar si los datos que ofrece el modelo escogido pueden considerarse válidos. Este proceso es fundamental para poder garantizar la viabilidad del análisis de la información obtenida del susodicho modelo. De esta forma, se reduce considerablemente el error asumido cuando se realizan predicciones.

3.3.1. Preparación de datos y preprocesado

De todo el trabajo realizado, la preparación de los datos y realización del preprocesado puede parecer *a priori* la tarea más simple, aunque resulte ser la más compleja. La información que se ha obtenido ha sido recogida después de realizar extensas búsquedas de información y un arduo preprocesado para obtener una fuente de datos fiable, completa y consistente. Una vez obtenido esto, se ha realizado la preparación de los datos para que *WEKA* entienda y sepa leer el fichero y la separación entre cada variable. Por ese motivo, es necesario guardar todo el listado de variables en un fichero que sea compatible, en este caso, .csv. Este fichero es un tipo de documento el cual tiene los datos separados por comas, de ahí su nombre, *Comma-separated values*. Puesto que Excel es un formato específico de Microsoft, se debe guardar todo el contenido en un fichero de esas características.

Para que *WEKA* reconozca los valores numéricos del fichero de lectura, debido a la configuración de *Excel* en la versión Española, se ha tenido que abrir el archivo .csv en cuestión con el *Bloc de Notas* por generar problemas de lectura. El programa de minería de datos interpreta que las “,” son separaciones entre variables y al tener cifras con decimales separadas de tal forma, se ha tenido que realizar los siguientes cambios:

1. Seleccionar en la pestaña *Edición* y acceder a *Reemplazar*.
2. En *Buscar*, se ha introducido “,” y se ha seleccionado en *Reemplazar* “.” y se ha seleccionado en *Reemplazar Todo*.
3. Nuevamente se ha realizado el proceso anterior pero introduciendo “;” para que sean reemplazados por “;”.

Con esa modificación, el fichero ya debería ser leído por *Weka*, aunque para introducir todas las variables de carácter numérico, se ha requerido de un código en el lenguaje de programación orientado a objetos *Python* el cual se encuentra en el Anexo 1. El código ha modificado la fecha que se encontraba escrita en letras (por ejemplo: jun-14, ago-14) en parte por la conversión que realiza *Excel*, y se han creado dos columnas (MONTH y YEAR) las cuales una indica el año de la muestra y la otra indica el mes.

Una vez realizado este proceso, *WEKA* no ha mostrado más reticencias a la imposibilidad de leer el archivo con el conjunto de 2.592 cifras y ha mostrado los atributos tal y como se muestran en la siguiente figura pudiendo apreciar la distribución del conjunto de la muestra en sus diferentes variables.

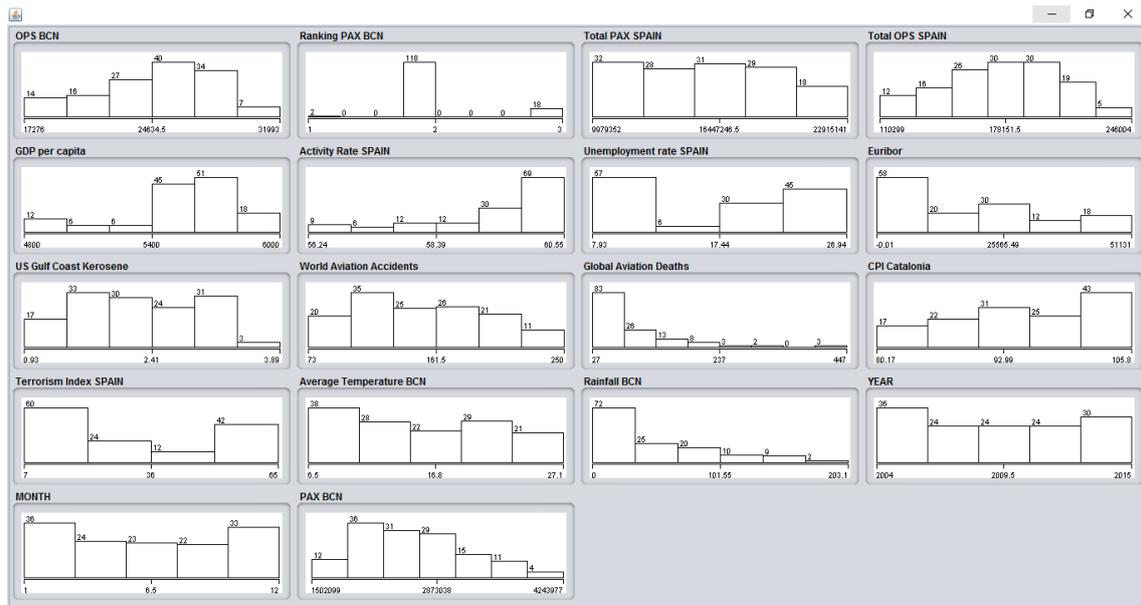


Figura 3.3 – Distribución del conjunto de la muestra de todas las variables en WEKA (Elaboración Propia)

Como se puede ver en el siguiente apartado, el fichero *dataprocessed* se ha tenido que dividir en dos ficheros diferentes en formato *.csv* y con su correspondiente modificación en el *Bloc de Notas*: los archivos son *TrainingModel* y *TestingModel*. El primero utilizado para el entrenamiento del modelo mientras que el segundo para hacer el testeo y comprobar la validez del modelo.

3.3.2. Creación y prueba del modelo predictivo

Una vez realizado toda la preparación y el preprocesado de los datos y la creación del modelo, es momento de escoger qué modelo predictivo se va a utilizar. El modelo utilizado ha sido el de Redes Neuronales Artificiales (RNA) debido a que según diversas publicaciones [Reza 2012] este método es el mejor encontrado para este entorno y proporcionado muy buenos resultados.

En el diagrama que aparece en la figura 3.4, se puede ver la representación gráfica de la Red Neuronal Artificial compuesta de 18 *inputs* que corresponderían a las 18 variables de entrada, 9 nodos en la capa oculta o *hidden layer* que son los que utilizará WEKA, y un *output* para extraer la previsión de la variable interesada, en este caso, el tráfico de pasajeros en el Aeropuerto de Barcelona – El Prat. Como se argumentaba en el apartado 2.3.1.3 los nodos están interconectados entre sí en paralelo, por ese motivo, aparecen tantas conexiones entre las capas de la figura mencionada.

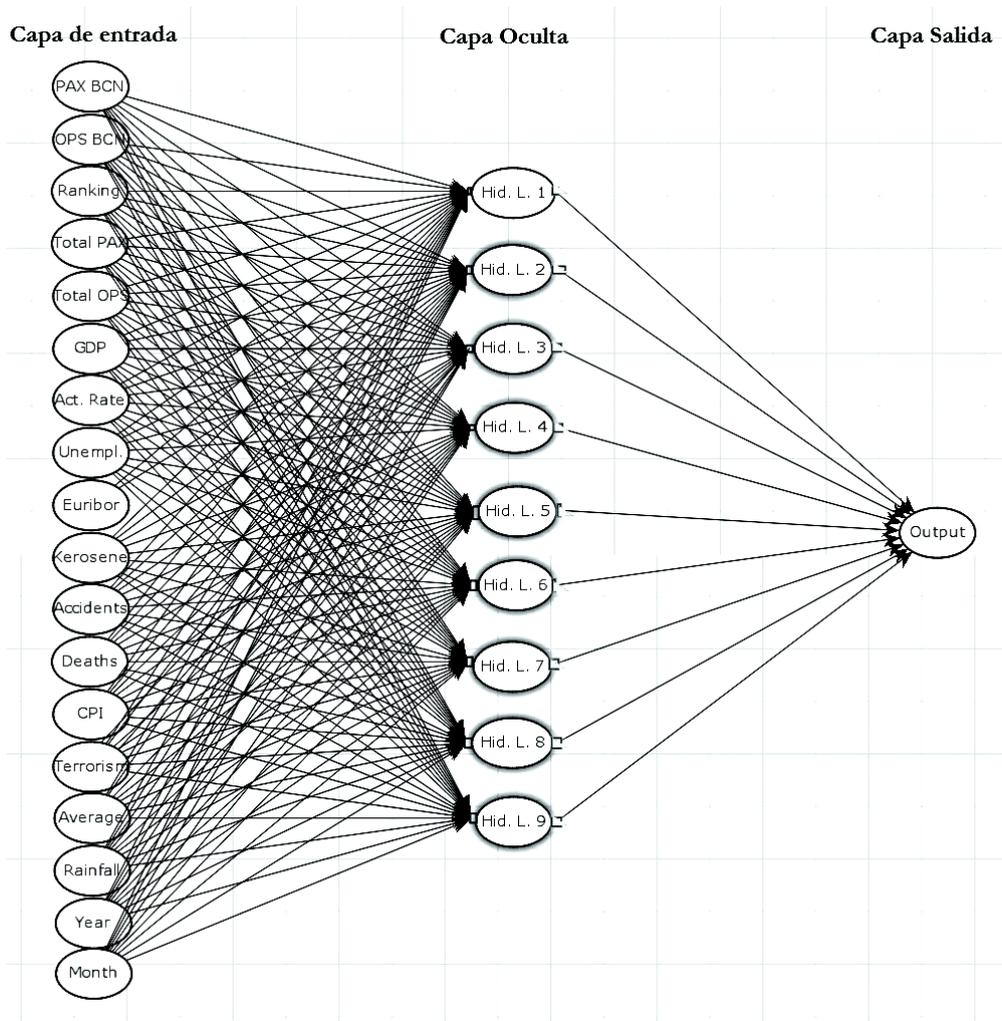


Figura 3.4 – Arquitectura empleada en el Perceptrón Multicapa de la Red Neuronal Artificial (Elaboración Propia)

La herramienta WEKA, introducida anteriormente en el apartado 3.3, tiene diversas funcionalidades. En el caso de estudio, se hace uso de la primera aplicación *Explorer* como se muestra en la figura 3.5, para analizar todo el listado de datos introducidos, su correlación y poder realizar el entrenamiento del modelo.

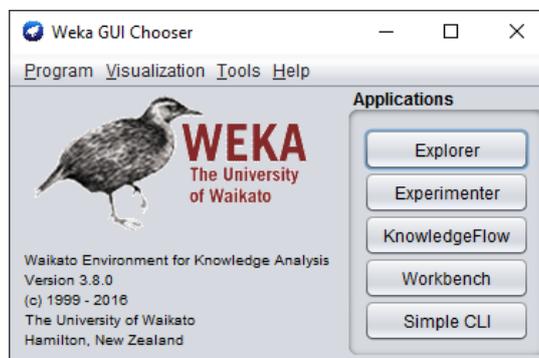


Figura 3.5 – Presentación del inicio del programa WEKA (Elaboración Propia)

Una vez seleccionada la opción, aparece una ventana (ver figura 3.6) la cual tiene habilitada la casilla *Open file...* para introducir la dirección del enlace al fichero del cual tiene que obtener todos los datos.

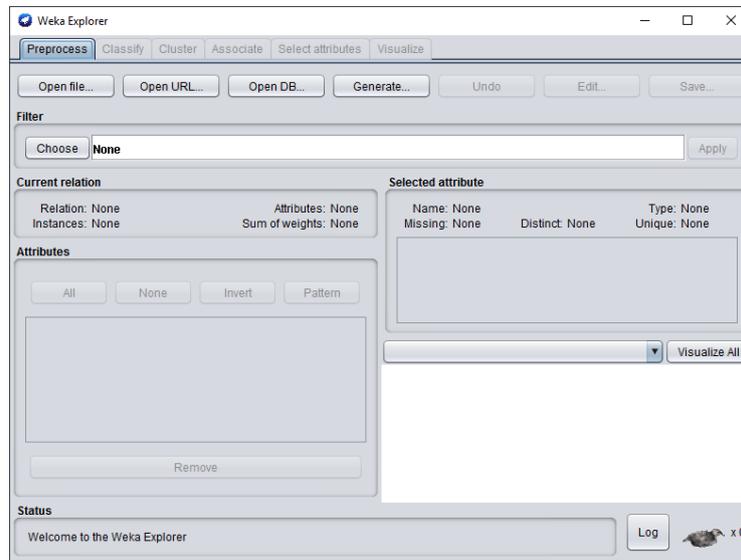


Figura 3.6 – Ventana de *WEKA Explorer* (Elaboración Propia)

El siguiente paso es escoger el fichero en su carpeta de origen, como en este caso, la carpeta *Información* y seleccionar el modelo en formato *.csv* que tenga los datos para hacer el entrenamiento del modelo. Como recordatorio, el fichero que contiene los datos de enero del 2004 a junio del 2015 es *TrainingModel.csv*.

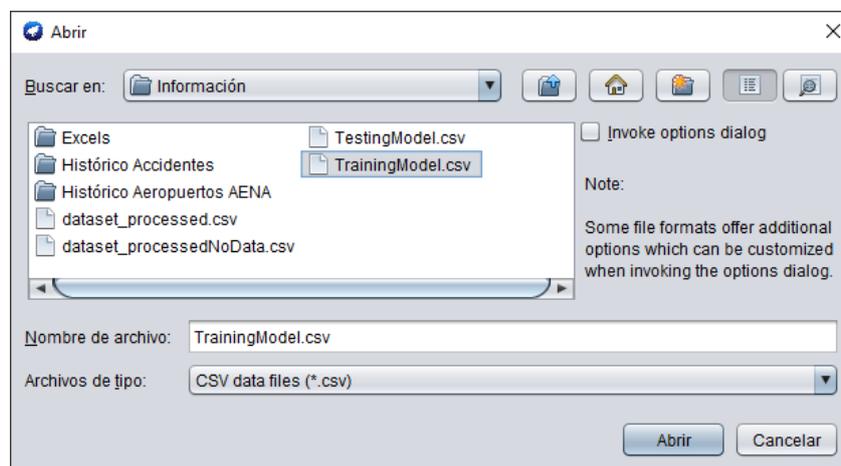


Figura 3.7 – Selección del fichero para realizar el entrenamiento (Elaboración Propia)

La variable *Data* es de tipo Nominal pero al tener variables de diferentes categorías (unas nominales y otras numéricas, gracias al código realizado en *Python* en el Anexo 1, ya no es necesario tener en el modelo dicha variable ya se encuentra en las variables *MONTH* y *YEAR* por lo que se puede suprimir directamente clicando en *Remove* dentro de la esquina inferior izquierda de la figura.

En caso de que tengamos variables numéricas, y por lo tanto sean de carácter cualitativo, deberemos utilizar filtros. Algunos de los filtros que encontramos son los siguientes:

- **Nominal to Binary:** filtro muy útil para representar información en forma binaria. Por ejemplo, para los días de la semana escritos en forma nominal (Lunes, Martes,...) puesto que crearía 7 columnas de 1 y 0. Es decir, tendríamos que para una semana tendríamos 7 variables. Para el martes, por ejemplo se representa: 0-1-0-0-0-0-0. Se obtendría una matriz identidad para cada semana como se muestra en la figura 3.8.

| | | | | | |
|---|---|---|---|-----|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | ... | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | ... | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | ... | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 1 |

Figura 3.8 – Parte reemplazada por la variable fecha (Elaboración Propia)

- **Standardize:** su uso es estandarizar cada variable e introducir los valores normalizados: la media sería igual a 0 y la variancia igual a 1. Los valores de las variables podría ser que sean negativos.
- **Normalize:** su uso es muy extendido ya que se utiliza para dar el mismo peso a todas las variables. Se coge el valor más alto igualándolo a 1 y el valor más pequeño igualado a 0 y se ajusta toda la muestra dentro de ese rango. En *WEKA* se hace automáticamente; la forma manual es abrir la pestaña *choose*, ir *unsupervised*, ir a *instance*). Por lo tanto, podemos decir que su uso es para cuantificar todas las variables dentro del mismo rango y dar el mismo peso.

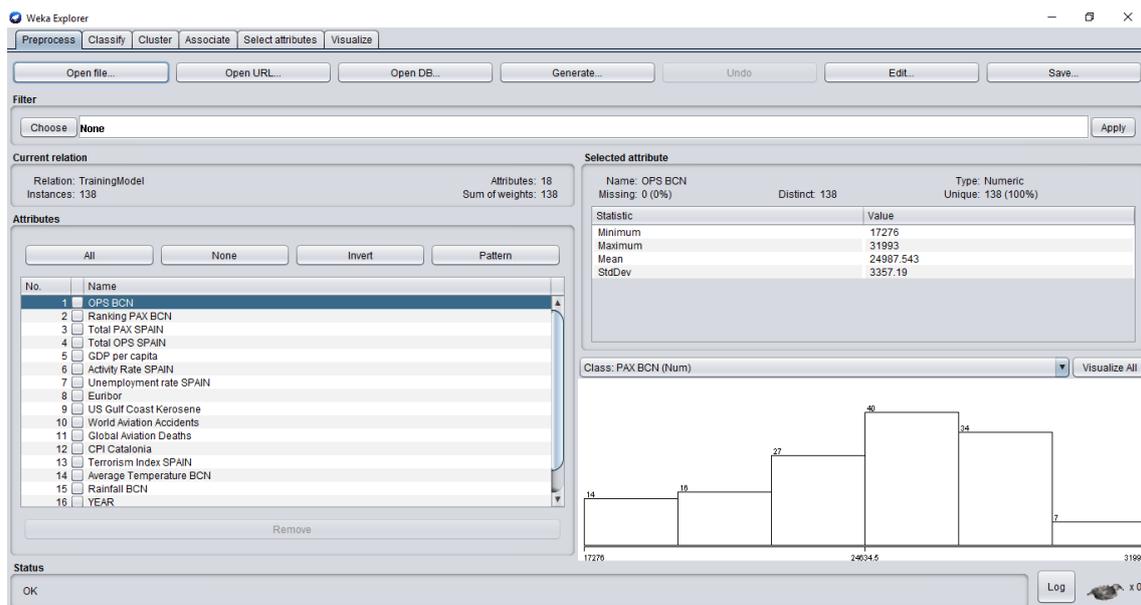


Figura 3.9 – Ventana de *WEKA Explorer* con el fichero *TrainingModel* (Elaboración Propia)

En la ventana de *Selected attribute* (figura 3.10) se puede ver un conjunto de información de gran utilidad del atributo seleccionado: el valor máximo, el valor mínimo, la media y la desviación estándar (para cuantificar la cantidad de variación o dispersión de una muestra). Es decir, una muestra con una baja desviación indicará que la nube de puntos estará definida, mientras que a mayor dispersión, mayor será el tamaño de la nube y más distorsionada se verá. *Missing* es el número de celdas vacías, en este caso 0, *Distinct* es la cantidad de celdas diferentes que contiene la muestra y *Unique* es el valor opuesto a *Missing*, es decir, el conjunto de valores que dispone la muestra.

| Selected attribute | |
|--------------------|--------------------|
| Name: OPS BCN | Type: Numeric |
| Missing: 0 (0%) | Distinct: 138 |
| | Unique: 138 (100%) |
| Statistic | Value |
| Minimum | 17276 |
| Maximum | 31993 |
| Mean | 24987.543 |
| StdDev | 3357.19 |

Figura 3.10 – Ventana *Selected attribute* de *WEKA Explorer* (Elaboración Propia)

Una vez analizado el modelo, se puede dar paso a su entrenamiento. En la pestaña *Classify* tenemos que seleccionar el icono *Choose* para que se abra el desplegable que se muestra en la figura 3.11, y abrir la carpeta *Classifiers* seguidamente la subcarpeta *functions* y finalmente el archivo *MultilayerPerceptron*. La característica que posee este tipo de red es por estar formado de múltiples capas (entrada, ocultas y salida) pudiendo resolver únicamente problemas que no son linealmente separables. El motivo por el que se escoge esta Red Neuronal Artificial es por su sencillez que presenta en su funcionamiento y por no tratarse de un modelo como los *blackbooks*.

Estos modelos posiblemente puedan proporcionar resultados poco mejores pero su funcionamiento es totalmente opaco por lo que se ha descartado en este trabajo por sus pocas finalidades educativas. Se ha escogido *MultilayerPerceptron* llamado en castellano Perceptrón Multicapa por esa relevante cualidad.

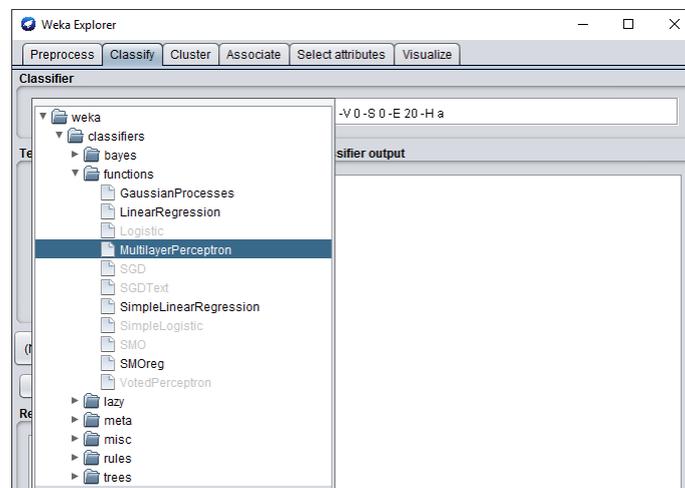


Figura 3.11 – Ventana *Classify* de *WEKA Explorer* (Elaboración Propia)

En este punto el modelo ya está casi listo para ser entrenado, aunque cabe añadir que los parámetros para realizar el entrenamiento son por el momento los que por defecto *WEKA* introduce. Para abrir la ventana de los parámetros se accede dándole *click derecho* al recuadro blanco que se sitúa a la derecha del botón *Choose*, y se abrirá una ventana como la figura 3.12. En el trabajo se realizarán tres entrenamientos del mismo modelo pero modificando los parámetros *learningRate* y *trainingTime*. El primero es utilizado para segmentar y desmenuzar las variables para analizarlas. Utiliza la *Perceptron Learning Rule* y mediante un coeficiente n observa cómo cambian los pesos de ponderación w . Cuanto más bajo sea n , tendremos un proceso de entrenamiento más largo, pero un resultado más preciso. Es decir, si el número es más pequeño, el modelo podrá observar con más detenimiento las fluctuaciones que han tenido las variables.

El *trainingTime*, acota el número de iteraciones que debe hacer el modelo. Dicho de otro modo, cuanto mayor sea el número de iteraciones, más situaciones habrá visto de ese modelo y por lo tanto, más tiempo tardará en realizar el entrenamiento.

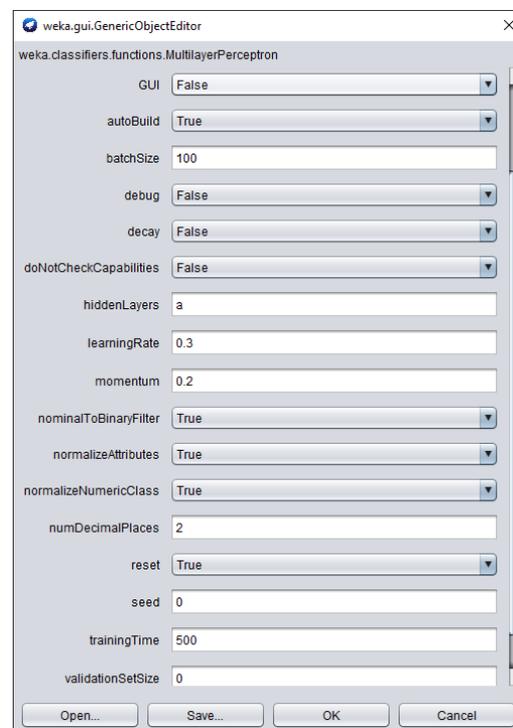


Figura 3.12 – Modificación de parámetros en *WEKA Explorer* (Elaboración Propia)

Por defecto también, el programa selecciona en *Test options* la opción *Cross-validation*. Las diferencias entre las diferentes formas de testeo son las siguientes:

- **Use training set:** en casos en que el conjunto del test sea igual al conjunto de las variables de entrenamiento. El porcentaje de acierto será muy elevado, por lo que no sería un resultado objetivo.
- **Supplied test-set:** para situaciones en que se disponga de un fichero con información de períodos diferentes a los datos utilizados en el entrenamiento, como sería el caso.

- **Crossvalidation:** obtiene el porcentaje de acierto haciendo una validación cruzada de k hojas.
- **Percentage split:** sería similar a la función *Supplied test-set* pero el fichero cargado contendría todos los datos (entrenamiento y testeo) y lo separaría en dos en función del porcentaje introducido. Por defecto, el 66% sería entrenamiento y el 33% testeo.

Como se ha querido proporcionar toda la información recogida por separado, la opción para el testeo escogida es la *Supplied test-set*.

Una vez se ha escogido la opción de testeo, hay que escoger la variable que se quiere prever. Ésta se encuentra en la pestaña inmediatamente superior a *Start* (en la imagen aparece *(Num) PAX BCN*), en este caso ya estaría seleccionada. Para obtener los resultados en un fichero .csv se tiene que clicar en *More options...*, clicar en *Output predictors*, en donde seguramente aparezca *Null*, y ahí escoger en el formato que se desea guardar el archivo (.csv es lo recomendado) y darle a *OK*. Una vez completado esto, ya se puede iniciar el testeo del modelo dándole a *Start*. En ese momento, el pájaro que se encuentra en la esquina inferior izquierda empezará a moverse de lado a lado indicando que el programa está en ejecución.

El resultado que aparecerá con los parámetros por defecto es el que se encuentra en la figura 3.13. En la ventana inferior izquierda (*Result list*) aparece la lista con todos los entrenamientos que se han hecho en el caso que se hayan realizado anteriores y en la ventana derecha (*Classifier output*) se muestran todo el procedimiento realizado y la previsión.

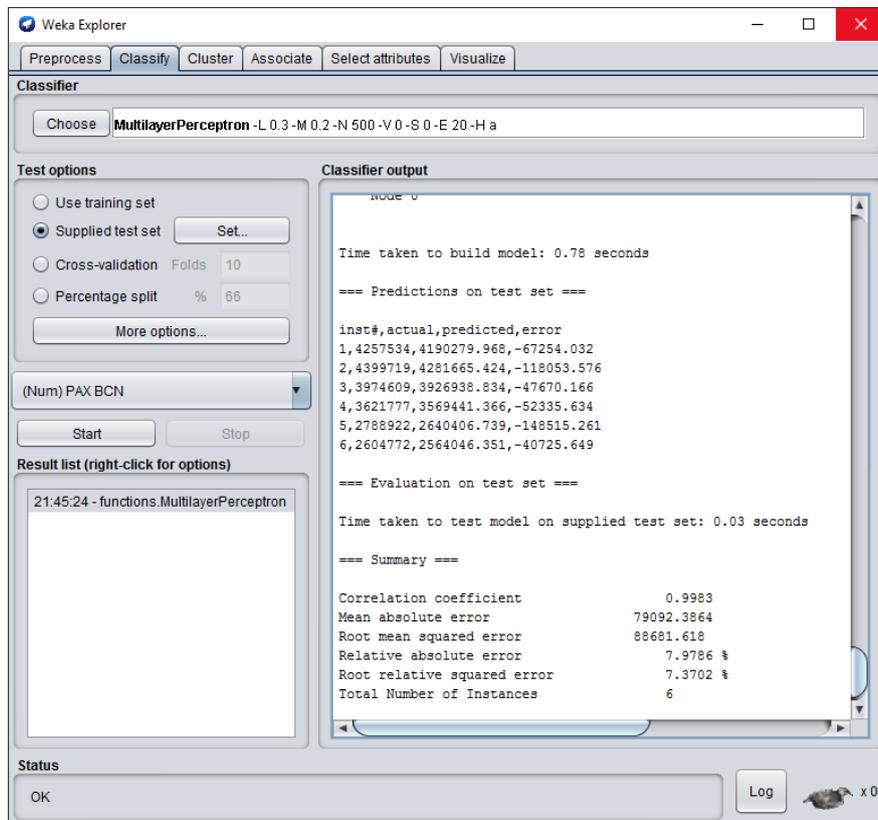


Figura 3.13 – Previsión con parámetros iniciales: L=0.3 N=500 (Elaboración Propia)

En total se ha realizado el entrenamiento y testeo del mismo modelo con tres previsiones diferentes modificando los valores de los parámetros de la red *MultilayerPerceptron*. Los dos modelos han sido modificados en los parámetros enunciados en este apartado y el primero se ha dejado con los valores que tiene por defecto:

1. Modelo predefinido: $L = 0.3$ y $N = 500$
2. Modelo mejorado: $L = 0.03$ y $N = 500000$
3. Variación del modelo mejorado: $L = 0.01$ y $N = 500000$

En los anexos 2 y 3 se pueden ver las capturas de pantalla de los resultados obtenidos para los modelos MPL-0.03-500000 y MLP-0.01-500000.

3.4. Análisis y visualización de resultados

De los tres modelos obtenidos según la modificación que haya sufrido cada parámetro han dado resultados diferentes. Por esa razón, se realiza un gráfico con la proyección de los tres modelos a lo largo de ese período, teniendo como referencia el tráfico que finalmente fue el que hubo en el aeropuerto. En todos los gráficos se han mantenido los mismos colores para cada modelo, con tal de mejorar la comprensión del análisis. De color azul encontramos el modelo prefijado por el programa, seguidamente encontramos de color verde el modelo con una modificación considerable de los parámetros y por último en color amarillo el modelo que mejores resultados ha proporcionado.

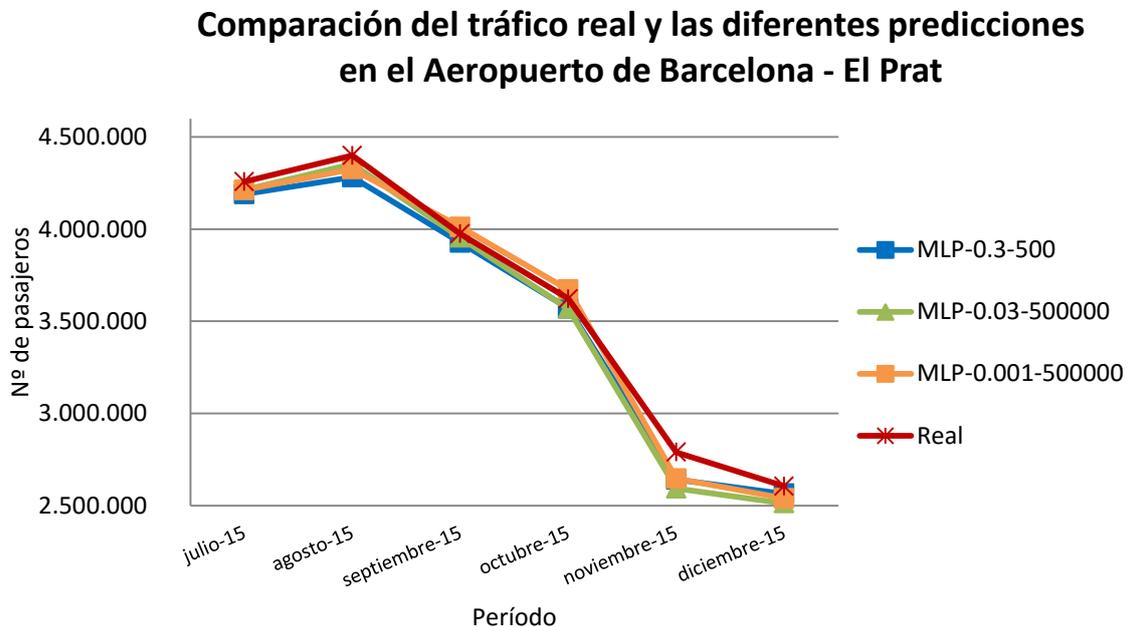


Figura 3.14 – Gráfico comparativo del conjunto de las previsiones obtenidas sobre el tráfico (Elaboración Propia)

En la figura anterior se puede ver como las previsiones de los tres escenarios han sido bastante ajustadas a excepción de los últimos dos meses que han quedado ligeramente inferiores al tráfico real. De igual forma que se ha enumerado en distintas partes del trabajo, una suposición para entender esa variación es la distancia que separa el período predicho de

la situación actual. Es decir, empieza a acercarse al período del largo plazo y hay una dificultad añadida en ese escenario. Otra posible causa puede darse en que esos meses en períodos pasados no hayan crecido a perdido pasajeros de igual manera, por lo que dificulta al modelo ver la tendencia y dar un valor certero.

Si analizamos el mismo gráfico de las previsiones pero en vez de distribuir por meses el tráfico, distribuimos el error que han obtenido, podemos ver que: la diferencia en número de pasajeros respecto al tráfico real es más pronunciada en el mes de noviembre del 2015 y seguido del mes de agosto que se encontraría en segunda posición con mayor error medio absoluto. En menor cantidad, pero con cifras significativas encontramos los meses de julio y octubre del 2015. *A priori* parece ser que las previsiones con menor acierto son la MLP-0.3-500 y la MLP-0.03-500000, y es cierto. Para verlo más en detalle, en la figura 3.15 se encuentran por porcentaje de error absoluto relativo.

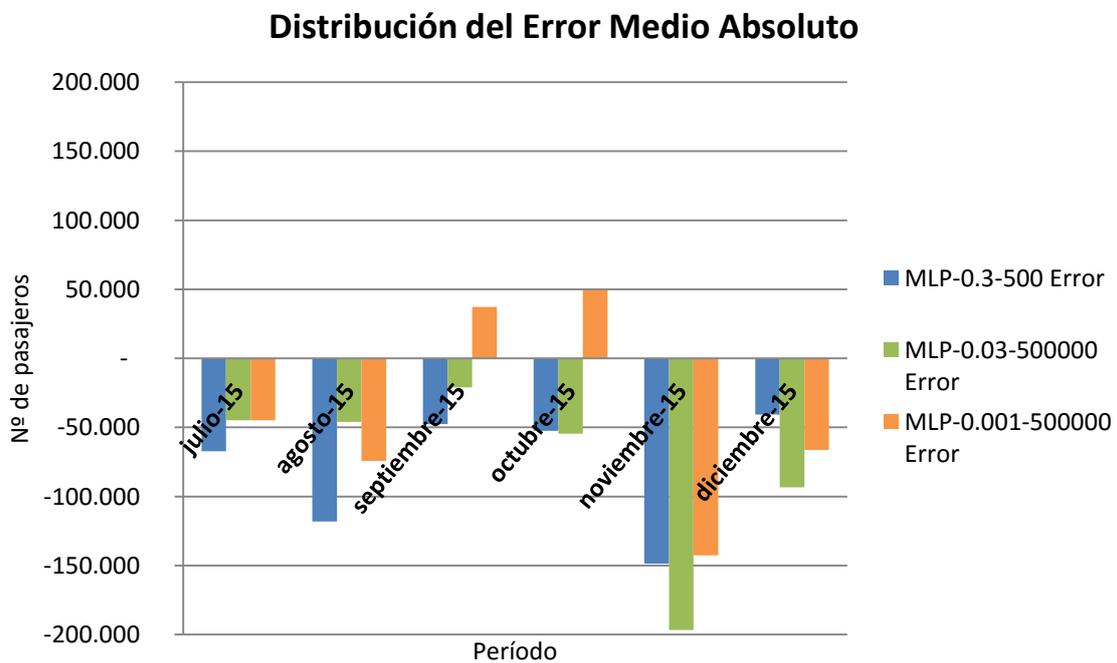


Figura 3.15 – Gráfico comparativo del conjunto de previsiones por error medio absoluto mensual (Elaboración Propia)

Para acabar con los gráficos comparativos entre las tres previsiones, en el siguiente podemos ver el porcentaje de error absoluto relativo por previsión. De color azul, se encuentra la previsión que hacía el programa por defecto con un 7,98%. En verde la previsión que daba resultados bastante mejorados con un 7,67% y por último, en naranja, la previsión mejorada con el 6,97%. La diferencia entre ellas respecto a la MPL-0.3-500 es de un punto porcentual la mejor previsión y de 0,3 puntos porcentuales respecto a la MPL-0.03-500000.

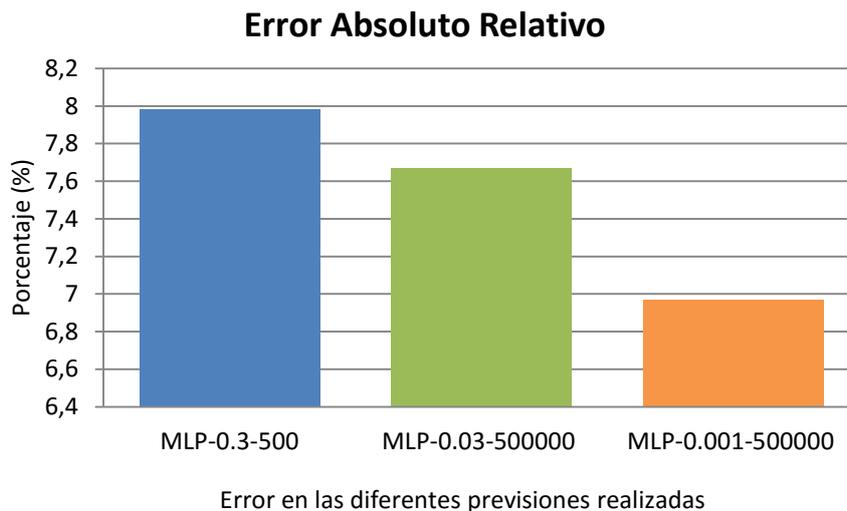


Figura 3.16 – Gráfico comparativo del conjunto de previsiones por error medio absoluto mensual (Elaboración Propia)

El tiempo requerido para realizar cada predicción ha crecido en función de la modificación de sus parámetros. En estos casos no hay un tiempo predefinido, un mínimo o un máximo, sino que a raíz del modelo escogido y parámetros posteriormente modificados, el modelo finalmente realiza la parametrización que se le marca. A mayor tiempo de entrenamiento y menor tasa de aprendizaje, más tiempo tardará en obtener los resultados. Como detalle a destacar, la que peor resultado ha dado (ver Tabla 3.2) no ha tardado ni un segundo en realizar el entrenamiento y testeo. En cambio las otras dos predicciones han tardado cerca de 10 minutos en encontrar la predicción para los seis meses.

Tabla 3.2 – Comparación del tiempo requerido para la construcción del modelo (Elaboración Propia)

| Modelo | Tiempo construcción del modelo (seg) |
|------------------|--------------------------------------|
| MLP-0.3-500 | 0,78 |
| MLP-0.03-500000 | 587,78 |
| MLP-0.001-500000 | 591,11 |

Se han realizado tablas y gráficos por separado para ver la predicción respecto al tráfico real de pasajeros los cuales se encuentran en el anexo 4. A grandes rasgos, por predicciones se pueden sacar los siguientes análisis:

1. **MPL-0.3-500:** el tiempo requerido es uno de los factores a destacar. El error absoluto relativo es del 8% aproximadamente y como modelo para extraer una tendencia a nivel general es muy interesante.
2. **MPL-0.03-500000:** es un modelo perfeccionado con un margen de precisión elevada y la tasa de error absoluto aproximado es del 7,5%. El resultado es acertado en los cuatro primeros meses pero en noviembre y diciembre del 2015 el error es muy elevado. El modelo es 500 más lento que el anterior, aunque la precisión y la certeza se mejoran.

- MPL-0.01-500000:** es el modelo que mejor resultado proporciona. Los meses centrales de la previsión (septiembre y octubre del 2015) posee un mínimo margen de error mientras que de la misma forma que en los anteriores, en noviembre y diciembre del 2015 tiene un resultado disímil. El tiempo de ejecución es muy parecido al MPL-0.03-500000 con un error absoluto poco inferior al 7%.

Si analizamos el resultado en función de dos perspectivas, la aeronáutica y la matemática encontramos que:

- **Perspectiva Aeronáutica:** recogiendo datos al alcance de la sociedad se han dado previsiones con un grado de precisión bastante elevado teniendo en cuenta que el sector aeronáutico es de los sectores más cambios repentinos existen. Este hecho y el de no haber podido disponer de la información solicitada a *Aena* y el escueto tamaño de la muestra en comparación con otras simulaciones (con cientos de miles de datos) da un resultado más que satisfactorio. Los múltiples factores que intervienen en el mercado aéreo, las constantes oscilaciones de precio de los billetes marcadas por el precio del combustible y otros muchos factores macroeconómicos hacen que como se detallará a en este capítulo, son necesarias las
- **Perspectiva Matemática:** desde un punto de vista teórico, las previsiones no han sido todo lo buenas que deberían haber sido. Si se tiene en cuenta el potencial de este tipo de redes, el error absoluto relativo, dependiendo siempre del modelo, debería haber estado en torno al 1%. La peculiaridad es que el escenario depende de cientos de variables tanto cuantitativas como cualitativas (como la impresión del transporte aéreo de un pasajero) las cuales son difíciles de recoger.

El motivo por el que no se ha realizado la predicción de los próximos 6 meses, por ejemplo, es porque no se podrían extraer grandes conclusiones hasta que una vez no hubiera pasado ese tiempo. Es decir, la parte correspondiente al *testing* no se podría haber elaborado. Era más interesante prever un período que recientemente ha pasado a uno que se desconocería su validez hasta que no se hubiera cumplido el período.

Cabe destacar que el modelo realizado recoge el escenario que se consideraría como posible según las fluctuaciones que han ido aconteciéndose. Es cierto que muchas veces hay avances de indicadores los cuales siempre existirán, por ejemplo el PIB o la evolución de los precios de los combustibles los cuales pueden hacer una idea de cómo evolucionará esa variable. Si se prevé una caída considerable del precio del petróleo u otro factor de riesgo o mejora (siempre habrá esa posibilidad), el escenario más probable es que los precios de los billetes se abaraten y crezca el número de pasajeros, bajando el coste de oportunidad del servicio por alcanzar a mayor número de pasajeros dispuestos a volar.

Para esas situaciones hay un análisis denominado en inglés *What-if* que haría lo siguiente: ante una previsión encontrada como las realizadas en este trabajo, se contempla el escenario esperado. Seguidamente se realizan hipótesis con otros datos que ayudan a contemplar prácticamente todos los casos, en el caso pesimista con la peor previsión obtenida marcando el mínimo del período predicho y el caso optimista que prevería el mejor escenario (un aumento del tráfico de pasajeros mayor al esperado formando en conjunto tres subcurvas. En la figura 3.17 encontramos el gráfico resultante de dicho análisis publicado por el diario *The Guardian* para los aeropuertos del Reino Unido, la línea central marcando el resultado esperado, y el área sombreada delimitando todos los casos contemplados en la previsión.

Cuanto más tiempo transcurre, el rango entre el mínimo y el máximo de ese instante de tiempo es cada vez mayor. Esto quedaría justificado, puesto que al estar el modelo más tiempo expuesto a posibles amenazas, la probabilidad que tenga más variaciones y por lo tanto más caída o crecimiento inesperado crece.

Previsión de pasajeros en aeropuertos del Reino Unido

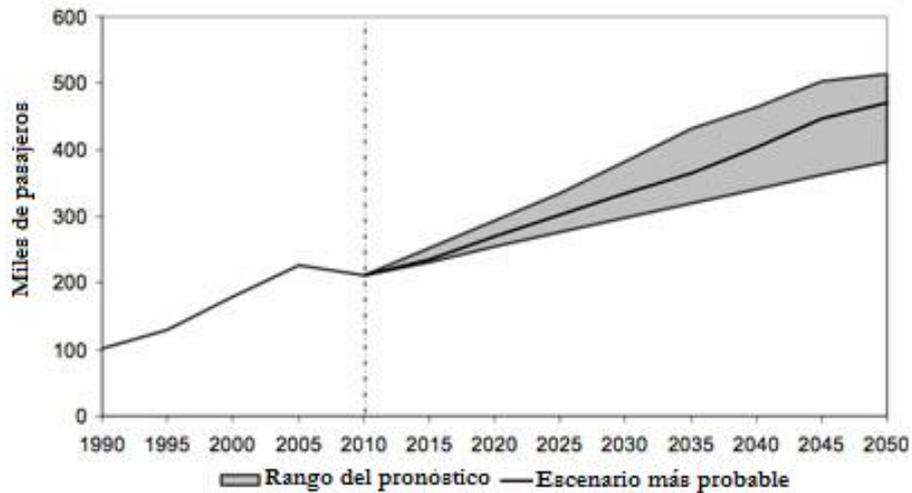


Figura 3.17 – Previsión tráfico de pasajeros en aeropuertos del Reino Unido (2010-2050)

Una vez finalizada la previsión, es momento de plantear una cuestión: ¿será capaz el aeropuerto de absorber el hipotético tráfico sin problemas? Tal y como se puede apreciar en la figura 3.18, se ha extraído un gráfico con la finalidad de ver el tráfico total que no ha contemplado el modelo MPL-0.01-500000 respecto al total de la capacidad que tiene el aeropuerto de Barcelona – El Prat de 55 millones de pasajeros anuales. Se puede apreciar como del conjunto de los seis meses estudiados y con un error del 6,97% el ese modelo ha dejado de contemplar a un total de al 1% de 241.256 pasajeros del total de 27,5 millones que sería capaz de absorber en medio año.

El exceso de capacidad que tiene infrautilizada, un 22% responde claramente al asunto enunciado en el capítulo 1 acerca de la nueva terminal satélite proyectada: *Aena* no contempla ampliar la capacidad de la zona aire ni la zona terminal en los próximos 5 años. El aeropuerto puede acoger a poco más de 6 millones de pasajeros, por lo que momentáneamente parece ser que no sería necesario iniciar las obras de la nueva infraestructura.

Comparación de la capacidad utilizada en el Aeropuerto de Barcelona - El Prat de Julio 2015-Diciembre 2015 (en millones de pax)

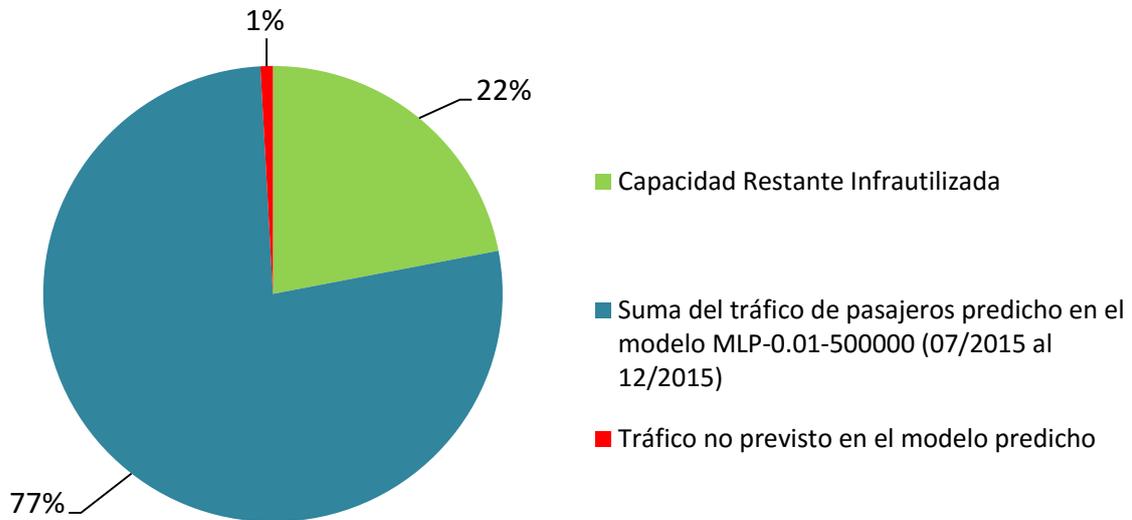


Figura 3.18 – Distribución de la capacidad disponible, ocupada y la diferencia con la prevista por MLP-0.01-500000 (Elaboración Propia)

En el caso de prever una demanda superior a la capacitada, se pueden optar por las medidas que se sugieren en el apartado 1.3.2. Remarcar que no en todos los entornos esas prácticas están reguladas, como es el caso de España, por lo que no podrían ser del todo soluciones viables al problema originado. Sería interesante poder realizar la asignación de *slots* en forma de subasta, y de esa forma asegurar la distribución de todas las compañías por todas las franjas a lo largo del día. Esta medida se estudió, pero las compañías que no poseen de numerosas rutas ni vuelos se opusieron contundentemente por salir gravemente perjudicadas al no poder competir con las grandes alianzas.

Para finalizar con el marco práctico, es conveniente poder analizar la información recibida por parte de *Aena* con la comunicación que se pudo mantener (ver Anexo 6). Los aeropuertos dirigidos por este ente se ven afectados por tres factores: la evolución de la economía española, la evolución de los países del Entorno Económico Europeo (hace especial referencia al Reino Unido, Alemania, Francia e Italia por ser los países con más tráfico dentro de ese entorno) y los indicadores de la actividad turística puesto que cerca del 80% lo hacen por avión.

Por otro lado, *Aena* ha facilitado la combinación de los sistemas utilizados para realizar las previsiones del tráfico aéreo:

- **Largo plazo:** utiliza el modelo *top-down* para analizar entornos macroeconómicos. Esta metodología realiza la toma de decisiones siguiendo un orden que generalmente va desde las variables más generales a variables más particulares o específicas. De esa forma, se le da más importancia a los *inputs* más macroeconómicos como el PIB, el IPC o el turismo, hasta alcanzar los microeconómicos como los ingresos de una aerolínea concreta.

- **Corto plazo:** utiliza el modelo *bottom-up* generalmente para análisis de rutas. Su uso es opuesto a la metodología *top-down* por lo que analiza primero las variables microeconómicas hasta alcanzar las variables globales para ver cómo fluctuaría el tráfico en el corto plazo.

Gracias a la combinación de ambos métodos, *Aena* ha sido capaz de desarrollar su propio modelo econométrico llamado *Prognosis Integrada de Sistemas de Tráfico Aéreo* (PISTA) el cual se identifica como un modelo multiecuacional de demanda. El motivo de su desarrollo ha sido para tener la capacidad para realizar predicciones a corto y largo plazo del tráfico de pasajeros y operaciones de aeronaves.

El modelo PISTA no proporciona un resultado final, sino que éstos resultados necesitan ser analizados para estudiar la tendencia histórica y la previsión de las variables explicativas. Para acabar de perfilar el resultado según el aeropuerto, se le proporciona información detallada de los siguientes aspectos para ajustar la previsión:

- Solicitud de slots demandados por las compañías aéreas del aeropuerto
- Información sobre las perspectivas de las compañías aéreas
- Estudio de la competencia con otros medios de transporte (AVE, ferry, ...)
- Información facilitada por los aeropuertos sobre obras, nuevas construcciones u otros elementos que puedan alterar el modelo

Una vez visto cómo realiza las previsiones *Aena*, por último sería interesante comparar ambas previsiones. Ciertamente es que por lo que referencia a datos, el ente debe tener una base de datos considerable, podría tener recogidas las variables diariamente. Por otro lado, el acceso a la información y el posicionamiento acerca de noticias, modificaciones en el aeropuerto y posibles mejoras que posee es sumamente mayor al que cualquier ciudadano ajeno a ésta pueda tener. Para finalizar con la comparativa, *Aena* posee de personal sumamente cualificado en el campo de la estadística y las matemáticas por lo que el conocimiento y la experiencia que puedan poseer del sector lo más probable que le permitan obtener modelos más fiables y por consiguiente con mayor precisión a los encontrados. A pesar de ello, el modelo que se ha obtenido no es nada despreciable a estos métodos, puesto que aunque su finalidad haya sido puramente académica, el tiempo requerido y el nivel de recursos invertidos en éste son mucho más bajos, obteniendo resultados sorprendentemente mejores a lo esperado.

CONCLUSIONES

Para concluir la memoria presente, tras haber realizado extensas búsquedas de información tanto para contrastar y recabar información para la parte teórica y la práctica, se ha conseguido realizar la previsión con resultados mejores a los esperados, satisfaciendo así el principal objetivo que se había definido: encontrar una previsión del tráfico de pasajeros para el Aeropuerto de Barcelona – El Prat que sea lo suficientemente precisa para considerarla válida. La segunda tarea propuesta dentro del objetivo no se ha podido acabar de completar, puesto que *Aena* ha facilitado información general referente a su propio modelo econométrico, aunque lamentablemente no se haya podido realizar la comparación entre ambas previsiones.

Una de los factores determinantes a los que se ha concluido en la toma de decisiones sobre una previsión u otra ha sido la importancia de reconocer y entender las distintas metodologías para saber cuál es la que mejor se adapta. Puesto que existe una gran variedad de modelos, cada uno se comporta de forma diferente y enfocado a una situación diferente. Consecuentemente, una de las tareas más importantes es saber escoger la metodología que mejor pueda entrenar, testear y analizar el modelo.

Según diversos estudios y publicaciones, se concluye que para la predicción del tráfico de pasajeros, la mejor metodología es la Red Neuronal Artificial (RNA), por su comportamiento a tiempo real, la capacidad de operar con información incompleta, la auto-organización de la que dispone y por supuesto, el aprendizaje adaptativo. Es decir, la red se dota de poder de decisión para ponderar el peso de los arcos que conectan cada capa según los análisis realizados para obtener una solución lo más precisa posible.

La tarea que ha requerido más tiempo, sin duda ha sido la elaboración de un fichero de tipología *data mining* o minería de datos por la gran cantidad de información requerida para contrarrestarla con otras fuentes de información encontradas con las fuentes organismos o entidades públicas con tal de garantizar su fiabilidad. La forma de tratar con un fichero de tales características ha sido extremadamente compleja por las diferencias en el muestreo de las variables, o sin ir más allá, por la necesidad de transcribir celda a celda el valor de algún atributo por no dejar la propia referencia extraer ni copiar el valor histórico. En algunas fuentes de información los valores de las variables se encontraban en diferentes pestañas de la página, ordenadas cronológicamente, dificultando su registro de forma casi automatizada.

El aprendizaje realizado con la herramienta de minería de datos *WEKA* se considera uno de los aspectos mejor asimilados y de gran utilidad puesto que no se descarta realizar más previsiones en un futuro. El aprendizaje del programa es lento, aunque como sucede en el conjunto de programas informáticos, los tutoriales y manuales son de gran ayuda para conocer las múltiples características que ofrece. La particularidad de este programa es la posibilidad de modificar el código (de código libre) y pueden ser compartidas con el resto de usuarios cómodamente. De esa forma, las posibilidades de entrenamiento de variables como de testeo y análisis son ilimitadas.

De igual forma que se ha entendido y utilizado el programa *WEKA*, se ha podido implementar la función *MultilayerPerceptron* sin ningún tipo de problemas, al venir pre-configurada en el propio programa. El motivo por el cual se escoge el Perceptrón Multicapa dentro de los diferentes tipos de RNA es por ser una tipología de red sencilla y fácil de entender como también por trabajar de forma transparente. Se requería de una red que no tuviera su funcionamiento basado en *blackbooks*, es decir, modelos extremadamente complejos los cuales se desconoce parcialmente el funcionamiento que realizan por tener

cierto grado de opacidad. Por lo tanto, se ha escogido el Perceptrón Multicapa para poder realizar el respectivo análisis de su funcionamiento de tal forma que el modelo se muestre de forma entendible y clara.

Para dictaminar si un modelo es el adecuado tiene que poseer las tres cualidades enunciadas: precisión, sensibilidad y objetividad. Durante el análisis de éste se han extraído unas conclusiones: si hay un evento que tiene las características que no aparecían en el pasado, el modelo predictivo no será capaz de prever ese cambio. Además, el tamaño de la muestra a analizar es muy importante, ya que ligado a la conclusión anterior, faculta al modelo de más información, de tal forma que puede realizar entrenamientos más rigurosos y específicos.

Como aspecto relevante, el modelo MPL-0.001-500000 ha sido capaz de proporcionar un nivel de precisión mejor de lo esperado. Teniendo en cuenta que no es de los modelos más complejos que existen, y los datos utilizados eran limitados, ha podido encontrar una tendencia y un estrecho margen de variación al tráfico que se registró en el Aeropuerto de Barcelona – El Prat durante el período de julio a diciembre del 2015.

El problema de capacidad en aeropuertos generalmente viene producido por las congestiones tanto del espacio aéreo como de sus propias instalaciones. El origen de éstas es el cúmulo de tráfico inesperado en un momento determinado. Ese tráfico se tiene que regular, lo que genera del retraso de los vuelos que durante el día se han retrasado, o incluso por otras regulaciones que hayan sufrido. Una de las medidas que se propone es incrementar el tráfico en las horas valle (cuando hay menor tráfico) del aeropuerto y reducirlo levemente en las horas punta para evitar que acontezcan situaciones en que se paraliza la actividad aeroportuaria.

Otra medida que puede dar su efecto es premiar la puntualidad de las aerolíneas que operen en hora (en función de su Plan de Vuelo Inicial). Se le puede premiar tanto de forma económica con una reducción en las tasas que abonan al organismo aeroportuario, como también mediante privilegios. Por ejemplo, escoger los mostradores de facturación o las puertas de embarque deseadas. De esa forma, las aerolíneas tendrán otra razón más aparte de contentar al pasajero, para no generar congestiones provocadas por sus retrasos.

En todos los *outputs* o atributos de entrada siempre hay presente una incertidumbre la cual nos hará encontrar un mejor o peor modelo. Esta causa es debida a no se puede controlar el futuro. Lo que sí se pueden hacer son previsiones e incluso acotaciones realizando los tests *What-if* para contemplar todos los escenarios posibles, desde el más pesimista al más optimista. En el caso del estudio, se ha podido ver como el aeropuerto no ha tenido problema para afrontar a corto plazo la demanda que pueda alcanzar. Para ir más allá, directivos de *Aena* a los que se les ha preguntado durante el *I Seminario Aeroportuario*, han asegurado que el propio aeropuerto de Barcelona – El Prat dispondrá la capacidad necesaria para los próximos cinco años. Aun así, se considera que para evitar cometer el error de tomar como válida la previsión a largo plazo realizada, convendría seguir efectuando previsiones periódicas con la nueva información para reducir la incertidumbre y por consiguiente aumentar la precisión final del modelo predictivo.

En conclusión, el problema en la mayoría de los casos no se encuentra en la falta de capacidad del aeropuerto, sino en cómo se realice la gestión de esa capacidad.

Rubén López Tobal a 06 de julio del 2016

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Edición Web e impresa

- ADIF (2016). *Estación de Francia. Bienes artísticos del ferrocarril: Estaciones*. Consultado en www.adif.es/es_ES/ocio_y_cultura/fichas_informativas/ficha_informativa_00050.shtml
- AENA (2003). *Plan Barcelona - Nueva Terminal Sur*. Consultado en www.aeropuertodebarcelona.net/index_archivos/documentos/historia/presentacion_terminal_sur.pdf
- (2008). *Medium & Short Term Network Planning and Collaborative Airport Planning - Expert Group Experimental Plan*. Consultado en pág 23 de www.eurocontrol.int/medium-short-term-network-planning-and-collaborative-airport-planning-expert-group-experimental-plan
- (2010). *Informes Anuales: Informe 2010*. Consultado en www.aena.es/csee/ccurl/333/933/anualDefinitivos_2010.pdf
- (2013a). «Campo de vuelo, plataforma y áreas terminales de pasajeros», en *Plan director del aeropuerto de Barcelona*. Ministerio de Fomento, capítulo 3. Consultado en www.fomento.gob.es/NR/rdoonlyres/63A0E9C2-47A5-41A0-8246-3EBB384ACEAE/54148/Campo_vuelo_plataforma_areas_terminales_pasajeros.pdf
- (2013b). *Normativa de seguridad en plataforma*. Madrid: AENA, 9ª edición. Consultado en www.aena.es/csee/ccurl/57/12/NSP%202013.pdf
- (2015). *Guía de Tarifas 2015*. Edición marzo de 2015. Consultado en www.aena.es/csee/ccurl/757/657/Guia%20tarifas%20aena%20aeropuertos%202015_ed%20marzo.pdf
- (2016a). *Aeropuerto de Barcelona – El Prat. Historia*. Consultado en www.aena.es/csee/Satellite/Aeropuerto-Barcelona/es/Page/1045569607439/Historia.html
- (2016b). *Estadísticas de tráfico aéreo*. Consultado en www.aena.es/csee/Satellite?pagename=Estadisticas/Home
- (2016c). *Plan Director - Predicción*. Consultado en www.aena.es/csee/Satellite?cid=1072113221049&pagename=Microsite%2Fmicrosite&Language=ES_ES&SMO=4&p=1069068239175&other=1072113221487&c=Microsite_FP&MO=1
- Ruiz, Carlos Alberto y Basualdo, Marta Susana (2001). *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*. Consultado en www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monograis/matich-redesneuronales.pdf
- Clayton, Edward y Hilz, Andreas (2015). «Strategy&: Efficiency & Attitudes», en *strategy&*. Consultado en www.strategyand.pwc.com/perspectives/2015-aviation-trends

- Expansión. Datosmacro.com* (2016). «El PIB de España aumenta un 0,8%», primer trimestre de 2016. Consultado en www.datosmacro.com/pib/espana?anio=2016
- De Neufville, Richar y Odoni, Amadeo (2013). *Airport systems: Planning, design and management*⁷. McGraw Hill Education, 2ª edición.
- Espasa, Antoni (1978). «Estimación y selección de modelos econométricos dinámicos», en *Servicio de Estudios. Estudios económicos*, n. 11. Madrid: Banco de España. Consultado en e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/4438/Estimacionyselecciondemodeloseconometricosdinamicos.pdf;jsessionid=DEDC0C1C986C51F0FAF2F9D2E4EB901B?sequence=1
- EUROCONTROL (2013) *Changes of Growth 2013, Summary Report*. Consultado en www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/reports/201307-challenges-of-growth-summary-report.pdf
- European Central Bank (2016). *Euribor 3-month - Historical close, average of observations through period*. Consultado en: sdw.ecb.europa.eu/quickview.do?SERIES_KEY=143.FM.M.U2.EUR.RT.MM.EURIBOR3MD_.HSTA
- Excelsior* (2016). «Saturación y mal servicio en el Aeropuerto del DF; en caída libre» (2016), 1 de julio. Consultado en www.excelsior.com.mx/comunidad/2015/11/09/1056092
- Herrera García, Alfonso (2006). *Alternativas de solución para problemas de capacidad aeroportuaria*. Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, p. 17. Consultado en imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt284.pdf
- Hosteltour* (2016). «El Aeropuerto de Barcelona estará al límite para el verano, advierte USCA», 19 de julio. Consultado en www.hosteltur.com/116034_aeropuerto-barcelona-estara-al-limite-verano-advierte-usca.html
- ICAO (2006). *Manual on Air Traffic Forecasting*. 3ª edición. Consultado en www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf
- Indexmundi, 2016. “U.S. Gulf Coast Kerosene-Type Jet Fuel Spot Price FOB”. Consultado en www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel&months=180
- Instituto Nacional de Estadística (2016a). *Sección prensa / Encuesta de Población Activa (EPA)*. Consultado en www.ine.es/prensa/epa_tabla.htm
- (2016b). *INEbase / Estadísticas territoriales*. Consultado en www.ine.es/FichasWeb/RegComunidades.do?fichas=49&busec_comu=&botonFichas=Ir+a+la+tabla+de+resultados
- Institute for Economics & Peace: Vision of Humanity* (2014). «Índice de terrorismo». Consultado en www.visionofhumanity.org/#page/indexes/terrorism-index/2014
- (2015). “Global Terrorism Index 2015”. Consultado en economicsandpeace.org/wp-content/uploads/2015/11/Global-Terrorism-Index-2015.pdf

- Juan, Angel Alejandro. "Multiple Regression I". Material de la asignatura docente Mantenimiento, Mantenibilidad y Fiabilidad, 2015. Consultado en ajuanp.wordpress.com/pdfs/
- López, Nelly y Sandoval, Irma (2006). *Métodos y técnicas de investigación cuantitativa y cualitativa*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, Sistema de Universidad Virtual. Consultado en recursos.udgvirtual.udg.mx/biblioteca/bitstream/20050101/1103/2/Metodos_y_tecnicas_de_investigacion_cuantitativa_y_cualitativa.swf
- Mashable (2014). «Flight delays are costing Airlines serious money», 10 de diciembre. Consultado en mashable.com/2014/12/10/cost-of-delayed-flights/#Q_PgTKmBrEqW
- Mercado Financiero (2008). «Aena licita la construcción de la terminal satélite del Aeropuerto de Barcelona por ocho millones», 29 de noviembre. Barcelona: Europa Press. Consultado en www.europapress.es/economia/noticia-economia-empresas-aena-licita-construccion-terminal-satelite-aeropuerto-barcelona-ocho-millones-20081129115358.html
- Ministerio de Fomento (1999). *Plan Director del Aeropuerto de Barcelona*. Consultado en www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/AVIACION_CIVIL/POLITICAS_AEROPORTUARIAS/ITA/PLANES_DIRECTORES/PLANES_DIRECTORES/PD_Barcelona.htm
- Mitrea, C.A., Lee, C.K.M. y Wu, Z. (2009). *A Comparison between Neural Networks and Traditional Forecasting Methods: A Case Study*. Rijeka, Croatia: International Journal of Engineering Business Management, Vol. 1, N. 2. Consultado en hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=99713
- National Transportation Safety Board (2016). *Accident Synopses - by month*. Consultado en www.nts.gov/_layouts/nts.aviation/month.aspx
- Observatori Fabra: Secció meteorològica (2016). «Resums mensuals». Consultado en www.fabra.cat/meteo/resums/resums.html
- Ortega Figueiral, Javier (2013). «Las luces y sombras de Barcelona-El Prat», en *eldiario.es*, 21 de septiembre. Consultado en www.eldiario.es/economia/luces-sombras-Prat_0_177432831.html
- Reza Khosravani, Mohammad (2012). «Application of Neural Network on Flight Control», en *International Journal of Machine Learning and Computing*, Vol. 2, N°6. Consultado en www.ijmlc.org/papers/258-L40124.pdf
- Ricardo Bofill Taller de Arquitectura (2010). «Principios de economía del transporte». Consultado en www.antonibosch.com/system/downloads/240/original/EC-DERUS_Capitulo1.pdf?1297263921
- Silió, Elisa (2013). «El retraso de los aeropuertos tiene un precio», en *Escritura pública*, n. 79, enero-febrero, pp. 48-50. Consultado en www.notariado.org/liferay/c/document_library/get_file?folderId=12092&name=DLFE-85305.pdf

THE UNIVERSITY OF WAIKATO (2016). «Downloading and installing Weka». Descargado en www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/downloading.html

— (2016). «Weka 3: Data Mining Software in Java». Consultado en www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/

UNIVERSITAT MIGUEL HERNÁNDEZ. «Capítulo 1. Técnicas de Análisis de Datos en WEKA», en *Ingeniería de Sistemas y automática*. Consultado en <http://isa.umh.es/asignaturas/crss/tutorialWEKA.pdf>

Ilustraciones

Figura 1.1 – AENA, 2003. Plan Barcelona | Nueva Terminal Sur. Obtenida de www.aeropuertodebarcelona.net/index_archivos/documentos/historia/presentacion_terminal_sur.pdf

Figura 1.2 – Ricardo Bofill Taller de Arquitectura, 2010. Obtenida de www.ricardobofill.es/ES/697/arquitectura/portfolio/terminal-satellite-%E2%80%93-aeropuerto-de-barcelona.html

Figura 1.3 – Ricardo Bofill Taller de Arquitectura, 2010. Detalle de la terminal satélite del aeropuerto de Barcelona – El Prat. Obtenida de www.ricardobofill.es/ES/697/arquitectura/portfolio/terminal-satellite-%E2%80%93-aeropuerto-de-barcelona.html

Figura 1.4 – Ministerio de Fomento, 1999. PLAN DIRECTOR DEL AEROPUERTO DE BARCELONA. Obtenida de www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/AVIACION_CIVIL/POLITICAS_AEROPORTUARIAS/ITA/PLANES_DIRECTORES/PLANES_DIRECTORES/PD_Barcelona.htm

Figura 1.5 – Tabla del contenido del Plan Director Barcelona – El Prat 2003 y sus fases de izquierda a derecha (Elaboración propia). Datos obtenidos de www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/AVIACION_CIVIL/POLITICAS_AEROPORTUARIAS/ITA/PLANES_DIRECTORES/PLANES_DIRECTORES/PD_Barcelona.htm

Figura 1.6 – Comparación entre la previsión y el tráfico real en el Plan Director del Aeropuerto de Barcelona (1999) (Elaboración propia). Datos obtenidos de www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/1474888D-A377-42B0-9F06-85D35755D41F/54193/Apendice_B_Analisis_y_previsiones_trafico.pdf

Figura 1.7 – Aena, 1999. Plan Director del Aeropuerto de Barcelona. Obtenido de www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/1474888D-A377-42B0-9F06-85D35755D41F/54193/Apendice_B_Analisis_y_previsiones_trafico.pdf

Figura 1.8 – Aena, 1999. Plan Director del Aeropuerto de Barcelona. Obtenida de www.aena.es/csee/Satellite/Aeropuerto-Barcelona/es/Page/1045569607439/Historia.html

Figura 2.1 – Clasificación de los diferentes métodos de predicción (Elaboración propia). Datos obtenidos de www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf

Figura 2.2 – ICAO, 2006. Manual on Air Traffic Forecasting (pág 14). Obtenida de www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf

Figura 2.3 – ICAO, 2006. Manual on Air Traffic Forecasting (pág 14). Obtenida de www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf

Figura 2.4 – ICAO, 2006. Manual on Air Traffic Forecasting (pág 14). Obtenida de www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf

Figura 2.5 – ICAO, 2006. Manual on Air Traffic Forecasting (pág 14). Obtenida de www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf

Figura 2.7 – Politecnico di Milano, 2012. Classification Step. Obtenida de image.slidesharecdn.com/machine-learning-and-data-mining-14-evaluation-and-credibility-28463/95/machine-learning-and-data-mining-14-evaluation-and-credibility-19-728.jpg%253Fcb%253D1176687268

Figura 2.8 – ICAO, 2006. Manual on Air Traffic Forecasting (pág 29). Obtenida de www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf

Figura 3.2 – TAPOR, 2009. Discover Research Tools for Textual Study Obtenida de www.tapor.ca/system/icons/354/original/weka.png?1381344072

Figura 3.17 – *theguardian*, 2010. Does London need a new airport? Obtenida de www.theguardian.com/politics/reality-check-with-polly-curtis/2012/jan/18/air-transport-boris

ANEXO 1. Código para obtener los meses y años en código *Python*

```
import pandas as pd
import datetime

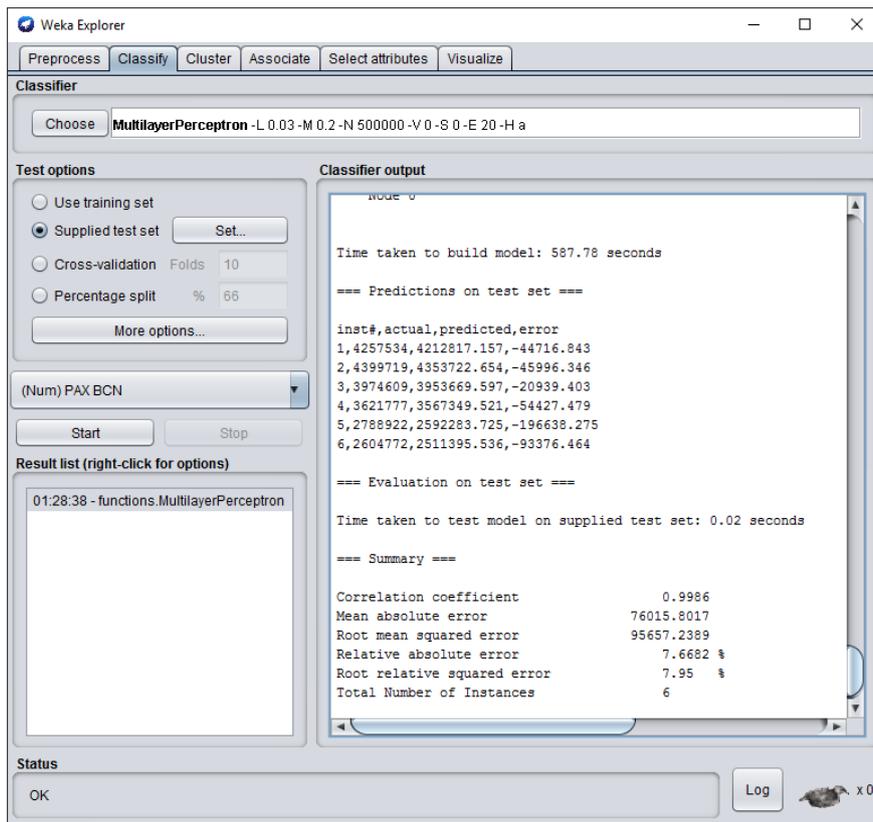
data =
pd.read_csv("D://UAB/2015_2016/2nd_semester/Ruben/data/dataset4.csv",
sep = ";")

features = [ 'PAX BCN', 'OPS BCN', 'Ranking PAX BCN',
            'Total PAX SPAIN',
            'Total OPS SPAIN', 'GDP per capita',
            'Activity Rate SPAIN', 'Unemployment rate SPAIN',
            'Euribor', 'US Gulf Coast Kerosene',
            'World Aviation Accidents', 'Global Aviation Deaths',
            'CPI Catalonia', 'Terrorism Index SPAIN',
            'Average Temperature BCN', 'Rainfall BCN']

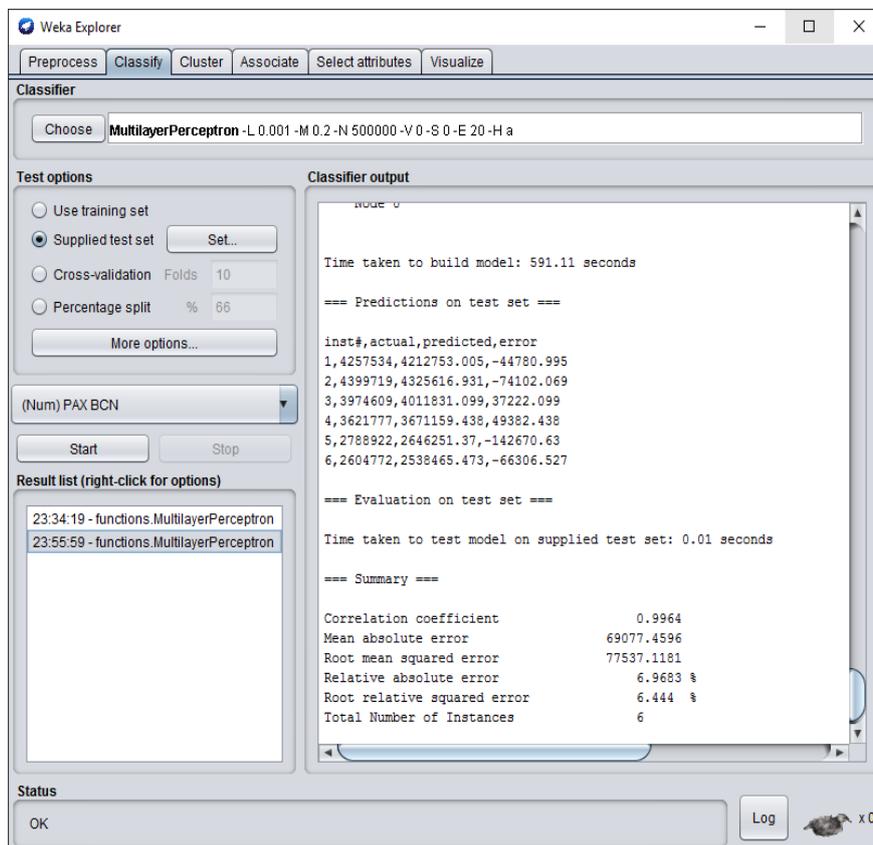
data[features].head()

#Obtaining YEAR & MONTH
data['YEAR'] = data['Fecha'].apply(lambda x:
datetime.datetime.strptime(x, '%B-%y').year)
data['MONTH'] = data['Fecha'].apply(lambda x:
datetime.datetime.strptime(x, '%B-%y').month)
data.to_csv('D://TFG/data/dataset_processed.csv', sep = ";", index =
False)
```

ANEXO 2. Captura del modelo de entrenamiento MPL-0.03-500000

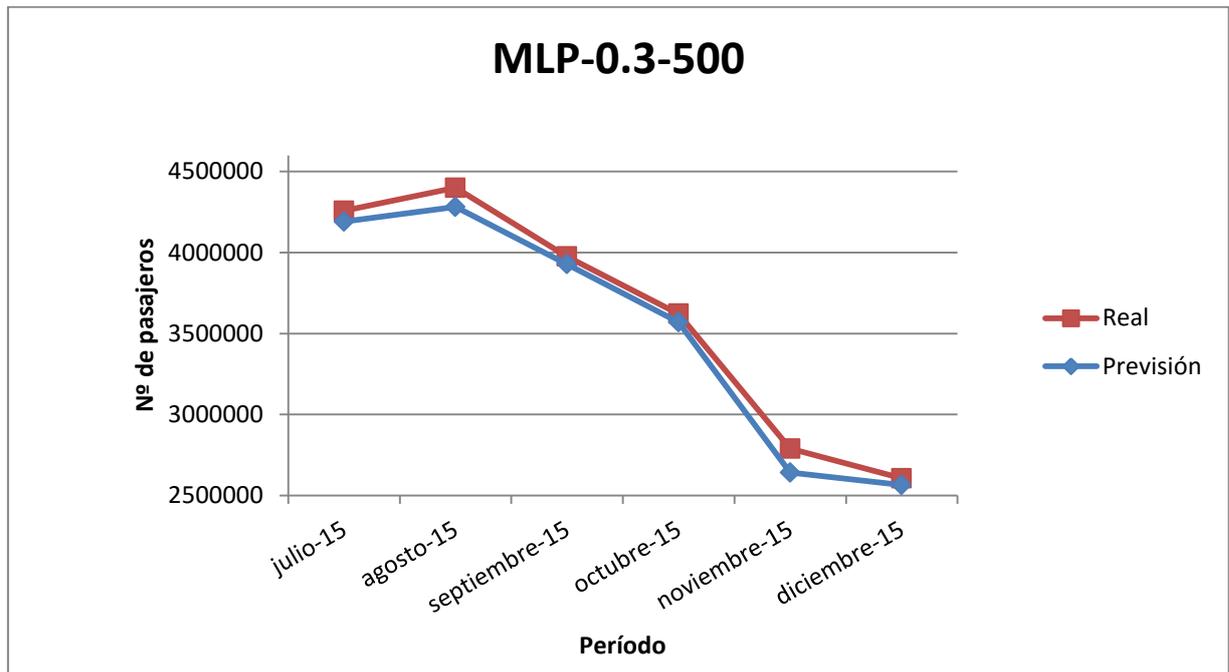


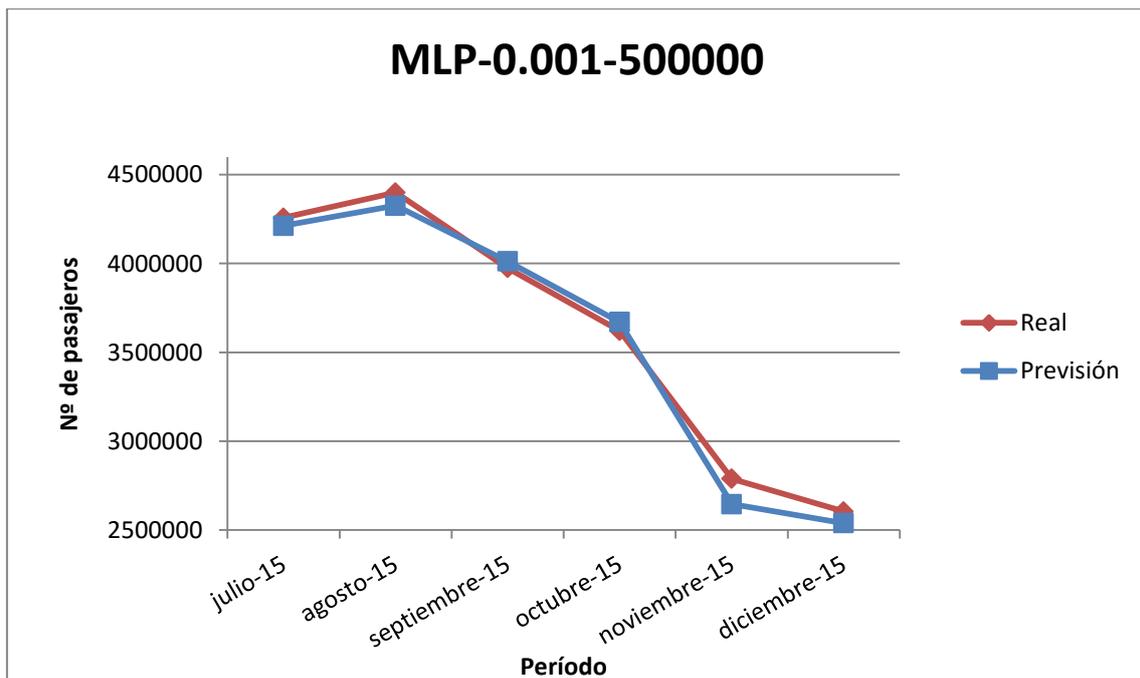
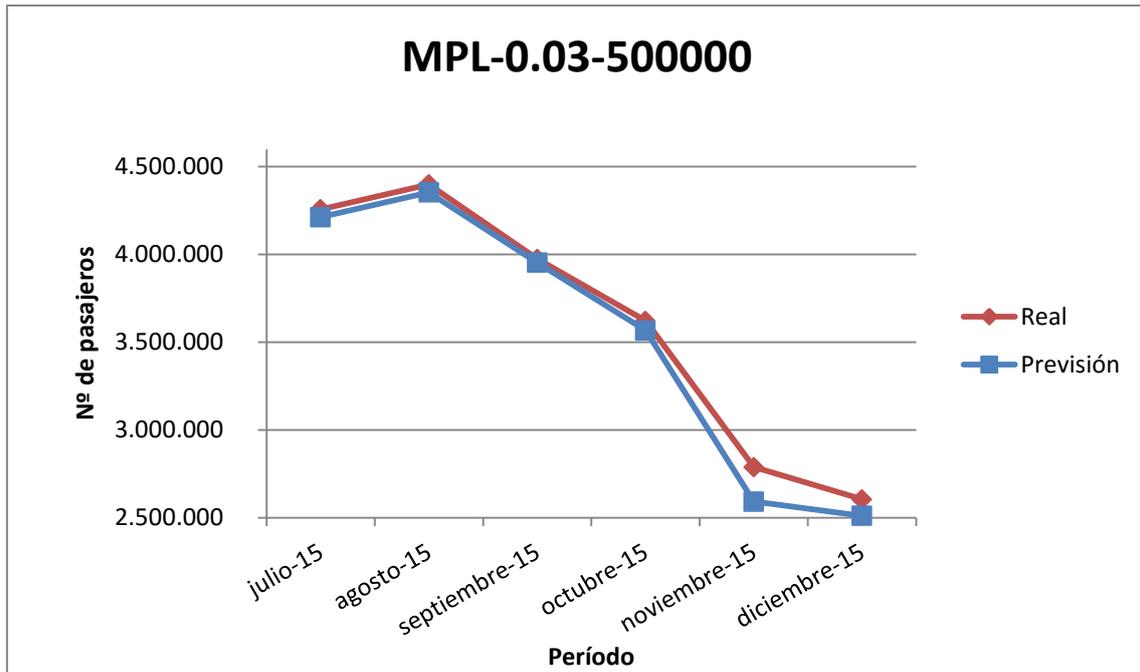
ANEXO 3. Captura del modelo de entrenamiento MPL-0.01-500000



ANEXO 4. Gráficos y tablas realizadas según el modelo de previsión

| Período | MLP-0.3-500 | MLP-0.03-500000 | MLP-0.001-500000 | Real |
|------------------------|---------------|-----------------|------------------|-----------|
| julio-15 | 4.190.280 | 4.212.817 | 4.212.753 | 4.257.534 |
| agosto-15 | 4.281.665 | 4.353.723 | 4.325.617 | 4.399.719 |
| septiembre-15 | 3.926.939 | 3.953.670 | 4.011.831 | 3.974.609 |
| octubre-15 | 3.569.441 | 3.567.350 | 3.671.159 | 3.621.777 |
| noviembre-15 | 2.640.407 | 2.592.284 | 2.646.251 | 2.788.922 |
| diciembre-15 | 2.564.046 | 2.511.396 | 2.538.465 | 2.604.772 |
| Parámetros modificados | L =0.3, N 500 | L 0.03 N 500000 | L 0.001 N 500000 | - |





| MLP-0.3-500 Error | MLP-0.03-500000 Error | MLP-0.001-500000 Error |
|-------------------|-----------------------|------------------------|
| - 7.254 | - 44.717 | - 44.781 |
| - 18.054 | - 5.996 | - 74.102 |
| - 7.670 | - 20.939 | 37.222 |
| - 52.336 | - 54.427 | 49.382 |
| - 48.515 | - 96.638 | - 142.671 |
| - 0.726 | - 93.376 | - 66.307 |

| Modelo | Error Absoluto relativo (%) |
|------------------|-----------------------------|
| MLP-0.3-500 | 7,98 |
| MLP-0.03-500000 | 7,67 |
| MLP-0.001-500000 | 6,97 |

ANEXO 5. Autorización aprobada por la UAB y solicitada por Aena

20 de abril del 2016

A quien corresponda,

Con el fin de poder realizar un encuentro, a poder ser presencial, con el responsable del área de planificación y previsión del tráfico de pasajeros del Aeropuerto de Barcelona – El Prat, acredito que **Rubén López Tobal** con DNI _____ y número de identificación de alumno (NIA) _____ es estudiante de la carrera de Gestión Aeronáutica y está actualmente realizando el Trabajo de Final de Grado.

Para poder contrastar la estimación obtenida con los modelos predictivos sobre el tráfico comercial de pasajeros, de dicho aeropuerto, requeriría el listado de variables que ustedes utilizan para realizar los cálculos y efectuar los correspondientes análisis de capacidad frente a demanda, como también de los resultados obtenidos del tráfico de pasajeros.

La información facilitada permanecerá confidencial y será utilizada únicamente con fines académicos, la cual siempre con su previa autorización podría ser incluida en el trabajo.

Cordialmente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'LN', written over a light blue grid background.

Dra. Liana Napalkova
Tutora académica del TFG



Escuela de Ingeniería
Campus Universitario de Sabadell
Universidad Autónoma de Barcelona

ANEXO 6. Comunicación mediante correo electrónico con *Aena*

De: Rubén L [mailto:rltruben@hotmail.com]

Enviado el: lunes, 18 de abril de 2016 17:56

Para: Aeropuerto de Barcelona - Información

Asunto: Solicitud de entrevista académica AENA

Buenas tardes,

Mi nombre es Rubén López y actualmente estoy haciendo el Trabajo de Final de Grado de la carrera de Gestión Aeronáutica. Dicho trabajo consiste en realizar una predicción de los pasajeros del aeropuerto de Barcelona - El Prat a corto y medio plazo.

Para poder contrastar y completar satisfactoriamente el trabajo, me gustaría poder realizar una entrevista informal de carácter académico con algún responsable que lleve a cabo las tareas de la planificación del aeropuerto mencionado.

En caso de que esta dirección de correo electrónico no sea la pertinente, ¿me podríais facilitar la del responsable o departamento en cuestión?

Un saludo y gracias de antemano,

Rubén López Tobal

De: bcninformacion@aena.es

Enviado el: martes, 19 de abril de 2016 11:40

Para: rltruben@hotmail.com

Asunto: RE: Solicitud de entrevista académica AENA

Apreciado Señor López,

En respuesta a su correo de fecha 18 de abril, nos ponemos en contacto con usted para informarle que, con el fin de poder gestionar su solicitud de información, deberá remitirnos una carta escaneada de su tutor Académico con firma y sello del Centro en que estudia, especificando la información que necesita, confirmando que es usted alumno de dicho centro y comprometiéndose a que toda la información que pueda obtener de este aeropuerto permanecerá confidencial y se utilizará únicamente con fines académicos.

Una vez que recibamos este documento, se le pondrá en contacto con el departamento correspondiente para que le puedan facilitar los datos que necesita.

Esperamos haberle sido de ayuda. No dude en contactar con nosotros para cualquier otra consulta.

Si lo desea puede visitar nuestra página web, www.aena.es.

Atentamente,

Oficina de Información Aeropuerto de Barcelona-El Prat.

De: Rubén L [mailto:rltruben@hotmail.com]

Enviado el: lunes, 02 de mayo de 2016 13:43

Para: Aeropuerto de Barcelona - Información

Asunto: RE: Solicitud de entrevista académica AENA

Buenas tardes,

Le informo que ya dispongo de la carta que ustedes me solicitan con la firma de mi tutora del trabajo, así como el sello de la universidad que acredita que soy estudiante de ésta y la finalidad académica de los datos que se me puedan llegar a facilitar. En ella, aparece toda la información requerida en el anterior correo.

Un saludo y espero una respuesta en breve para acordar una entrevista a poder ser presencial,

Rubén López Tobal

De: Aeropuerto de Barcelona - Información

Enviado el: martes, 03 de mayo de 2016 11:54

Para: rltruben@hotmail.com

Asunto: RE: Solicitud de entrevista académica AENA

Apreciado Señor López:

En respuesta a su correo de fecha 02 de mayo, nos ponemos en contacto con usted para comunicarle que su correo electrónico ha sido remitido al Departamento Correspondiente.

Quedamos a su disposición para cualquier otra consulta.

Si lo desea puede visitar nuestra página web, www.aena.es

Atentamente,

Oficina de Información Aeropuerto de Barcelona-El Prat.

De: Rubén L [mailto:rltruben@hotmail.com]

Enviado el: lunes, 11 de mayo de 2016 19:57

Para: Aeropuerto de Barcelona - Información

Asunto: RE: Solicitud de entrevista académica AENA

Buenas tardes,

Me lamenta comunicarles que por el momento no he recibido respuesta del departamento al que remitieron mi petición del 02 de mayo.

¿Sería posible que le enviaran de nuevo el correo a dicho departamento, para asegurar su correcto recibimiento y la propuesta de fecha propuesta? Desconozco si es posible, pero necesitaría realizar el encuentro en las próximas semanas para tener tiempo a realizar los análisis oportunos dentro del trabajo de investigación llevado a cabo.

Un saludo y gracias de antemano,

Rubén López Tobal

De: bcngdir@aena.es

Enviado el: martes, 31 de mayo de 2016 08:46

Para: rltruben@hotmail.com

CC: bcngdir@aena.es

Asunto: RE: Solicitud de entrevista académica AENA

Buenos días,

En respuesta a su solicitud de información de fecha 19 de abril de 2016, le agradecemos ante todo el interés que muestra por nuestro Aeropuerto, sus instalaciones y funcionamiento.

Nos gustaría poder ayudarle en su proyecto pero la información que Vd. nos solicita (resultados de previsiones de tráfico) está más allá del punto crítico de confidencialidad que no nos permite divulgarla. No obstante, sí que podríamos indicarle la metodología que se emplea para la obtención de la misma:

La evolución del tráfico aéreo en los aeropuertos españoles depende de tres factores fundamentales: la evolución de nuestra economía, la evolución de la economía en los países del Entorno Económico Europeo^[1] (en especial del Reino Unido, Alemania, Francia e Italia, al ser los principales mercados de origen/destino) y la marcha de la actividad turística, dada la fuerte vinculación entre el transporte aéreo y el turismo en España (cuatro de cada cinco turistas internacionales entran y salen por vía aérea). La previsión de tráfico aéreo realizada por Aena, S.A. se basa en la combinación del uso de dos metodologías: la Top-Down (modelo macroeconómico) para el tráfico a largo plazo y la Bottom-Up (análisis de rutas) para el corto plazo.

Para ello, Aena, S.A. ha desarrollado su propio modelo econométrico Prognosis Integrada de Sistemas de Tráfico Aéreo (PISTA) que es un modelo macroeconómico-multiecuacional de demanda. Su objetivo es dar la predicción a corto y largo plazo de la demanda de pasajeros y de operaciones, tanto en el segmento nacional, como en el internacional.

Metodológicamente, se analizan los datos históricos y su correlación con variables económicas (como el PIB), seleccionando aquellas variables que presentan mayor significatividad. Una vez elegidas las variables con mayor capacidad explicativa, se predice el tráfico agregado de los aeropuertos y la cuota de mercado que cada uno de

ellos representa respecto al total, teniendo en cuenta las interrelaciones de cada aeropuerto con el resto de aeropuertos y con el conjunto de la red.

Los resultados de la previsión obtenida por el Modelo PISTA (salida en bruto del modelo) sirven como punto de partida de las previsiones, puesto que proporcionan una tendencia basada en las series históricas y la previsión de las variables explicativas. Para obtener los resultados finales de la prognosis, se procede a ajustar la previsión que el modelo arroja para cada aeropuerto, teniendo en cuenta información disponible más detallada (bottom-up):

- ✦ Solicitud de slots por parte de las compañías aéreas (rutas, frecuencias, tipo de aeronave programada).
- ✦ Información de planes y perspectivas de compañías aéreas: estrategias de desarrollo, modelos de avión empleados – pedidos y opciones de compra.
- ✦ Competencia con otros modos de transporte.
- ✦ Información particularizada de cada aeropuerto: nuevas infraestructuras....
- ✦ Información facilitada por los aeropuertos.

Espero esta información sea de su utilidad.

Respecto a la entrevista que solicitó, si nos proporciona un teléfono nos pondremos en contacto con usted.

Reciba un cordial saludo,

Gabinete de Dirección

Aeropuerto de Barcelona-El Prat
Terminal T1, Dique Sur, Oficina 236-237
08820 El Prat de Llobregat, Barcelona
Teléfono 932 983 723

De: rltruben@hotmail.com

Enviado el: martes, 31 de mayo de 2016 11:00

Para: bcngdir@aena.es

Asunto: RE: Solicitud de entrevista académica AENA

Buenos días,

Ante todo, muchas gracias por haber contestado mi petición.

Me ha sido de gran ayuda la información sobre las metodologías facilitada en el correo, cosa que valoro muy positivamente. Aún así, si es posible creo que sería interesante realizar una entrevista a poder ser presencial para aclarar algunas cuestiones que se me han originado con la realización del trabajo.

El número de teléfono personal al que me podrán localizar es el 665***304.

Reitero mi agradecimiento por el esfuerzo realizado respondiéndome y espero poder tener dicho encuentro con ustedes.

Un saludo y gracias de antemano,

Rubén López Tobal

De: rltruben@hotmail.com

Enviado el: lunes, 13 de junio de 2016 19:52

Para: bcngdir@aena.es

Asunto: RE: Solicitud de entrevista académica AENA

Buenas tardes,

Les reenvío el mail del 31 de mayo para que lo tengan presente, debido a que empieza a acercarse el plazo de entrega del trabajo y no he recibido ninguna llamada al número facilitado ni posibilidad de entrevista.

Un saludo y gracias de antemano,

Rubén López Tobal