



Universidad Politécnica
de Madrid

**Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Informáticos**



Grado en Ingeniería Informática

Trabajo Fin de Grado

**Modelo de Simulación de las Líneas 6 y
10 del Metro de Madrid**

Autor: Manuel Sánchez Chapado
Tutor: Juan Antonio Fernández del Pozo

Madrid, junio 2024

Este Trabajo Fin de Grado se ha depositado en la ETSI Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid para su defensa.

*Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Informática*

Título: Modelo de Simulación de las Líneas 6 y 10 del Metro de Madrid
junio 2024

Autor: Manuel Sánchez Chapado
Tutor: Juan Antonio Fernández del Pozo
Departamento de Inteligencia Artificial
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos
Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

La modelización y simulación es una disciplina que ha transformado la forma en la que los investigadores son capaces de explorar la vida. Se trata de un área en constante crecimiento y evolución que permite representar de manera simplificada eventos concretos de la realidad y estudiar cómo se ve afectado el estado de un sistema ante la alteración de determinadas variables del entorno.

Con el fin de conocer en profundidad la red de transporte subterránea de la capital española y el comportamiento de las líneas 6 y 10 ante la ocurrencia de diversos eventos, en este proyecto se va a llevar a cabo una modelización y simulación de dicho sistema. Se tratará de estudiar algunos de los componentes que conforman la red de metro madrileña y cómo afectan al flujo de pasajeros diario.

Los datos obtenidos serán empleados para la realización de estudios y análisis estadísticos que permitan visualizar la conducta del modelo, identificando patrones y discutiendo ideas que sirvan de posibles herramientas sociales para la generación de conocimiento sobre las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid.

Abstract

Modeling and simulation represent a dynamic discipline that has revolutionized researchers' ability to explore life phenomena. This field, constantly expanding and evolving, offers a simplified representation of specific real-world events and allows for the study of how a system's state is influenced by changes in environmental variables.

In order to gain an in-depth understanding of the underground transportation network of the Spanish capital and the behavior of lines 6 and 10 in response to various events, this project will undertake modeling and simulation of the system. The aim is to examine key components of the Metro de Madrid network and their impact on daily passenger flow.

The data obtained will be used for conducting studies and statistical analyses to visualize the behavior of the model, identifying patterns, and discussing potential insights that could serve as potential social tools for generating knowledge about lines 6 and 10 of the Madrid Metro.

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Alcance	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Estructuración del documento	3
2. Estado del Arte	5
2.1. Visión histórica de Metro de Madrid	5
2.2. Evolución de los convoyes	8
2.3. Impacto cultural, social, económico y medioambiental	10
2.4. Simulaciones	12
2.4.1. Simulación de eventos continuos	13
2.4.2. Simulación de eventos discretos	13
3. Modelo empírico	15
3.1. Descripción	15
3.1.1. Estaciones	16
3.1.2. Trenes	18
3.1.3. Personas	19
3.2. Línea 6	20
3.3. Línea 10	23
4. Modelo matemático	27
5. Definición y construcción del modelo de simulación	31
5.1. Primer prototipo	31
5.2. Segundo prototipo	33
5.3. Tercer prototipo	35
5.4. Cuarto prototipo	36
6. Análisis de Resultados	39
6.1. Primer prototipo	39
6.2. Segundo prototipo	44
6.3. Tercer prototipo	52
6.4. Cuarto prototipo	58
7. Conclusiones	71

TABLA DE CONTENIDOS

7.1. Evaluación de los objetivos del TFG	71
7.2. Líneas futuras	71
7.3. Evaluación del proceso de realización del proyecto	72
7.4. Análisis de impacto	72
Bibliografía	75
Anexos	81
A. Anexo I: pseudocódigo del cuarto prototipo	81
B. Anexo II: listados de las estaciones numeradas	85
B.1. Estaciones numeradas de la línea 6	86
B.2. Estaciones numeradas de la línea 10	87
C. Anexo III: descripción completa de las estaciones	89
C.1. Línea 6	90
C.2. Línea 10	109
D. Anexo IV: recibo de Turnitin	127

Índice de figuras

2.1. Representación del antiguo coche Cuatro Caminos Fuente: crt.m	9
2.2. Mosaico en estación. Fuente: metromadrid.	10
2.3. Entrada a la estación Gran Vía. Fuente: TurismoMadrid	11
2.4. Gráfico comparativo de un modelo discreto y continuo. Fuente: fao.org.	14
3.1. Elementos de las estaciones. Fuente: metromadrid.	16
3.2. Plano del Metro de Madrid. Fuente: redtransporte.	17
3.3. Interior de un vagón de metro estándar. Fuente: Telemadrid, 2020. .	18
3.4. Representación de la estación de Avenida de América. Fuente: albertguillaumes.	21
3.5. Representación de la estación de Nuevos Ministerios. Fuente: albertguillaumes.	22
3.6. Representación de la estación de Cuatro Caminos. Fuente: albertguillaumes.	22
3.7. Representación de la estación de Moncloa. Fuente: albertguillaumes.	23
3.8. Representación de la estación de Chamartín. Fuente: albertguillaumes.	24
3.9. Representación de la estación de Tribunal. Fuente: albertguillaumes.	25
3.10. Representación de la estación de Plaza de España. Fuente: albertguillaumes.	25
3.11. Representación de la estación de Príncipe Pío. Fuente: albertguillaumes.	26
6.1. Matriz que almacena el avance y la posición de los trenes por las diferentes estaciones. Fuente: Elaboración propia.	39
6.2. Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.	40
6.3. Cantidad media de pasajeros que suben en cada tren por estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana). Fuente: Elaboración propia.	41
6.4. Cantidad media de pasajeros que bajan de cada tren por estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana). Fuente: Elaboración propia.	42
6.5. Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben a los trenes en cada estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana). Fuente: Elaboración propia.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

6.6. Variabilidad en la cantidad de pasajeros que bajan de los trenes en cada estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana). Fuente: Elaboración propia.	44
6.7. Matriz que almacena el avance y la posición de los trenes por las diferentes estaciones. Fuente: Elaboración propia.	45
6.8. Matriz que almacena los posibles transbordos. Fuente: Elaboración propia	45
6.9. Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.	46
6.10.Cantidad media de pasajeros que suben en cada tren por estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.	47
6.11.Cantidad media de pasajeros que suben en cada tren por estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.	47
6.12.Cantidad media de pasajeros que bajan de cada tren por estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.	48
6.13.Cantidad media de pasajeros que bajan de cada tren por estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.	49
6.14.Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben a los trenes en cada estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.	50
6.15.Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben a los trenes en cada estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia. . . .	50
6.16.Variabilidad en la cantidad de pasajeros que bajan de los trenes en cada estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.	51
6.17.Variabilidad en la cantidad de pasajeros que bajan de los trenes en cada estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia. . . .	52
6.18Data frame que almacena los trenes existentes en la red de metro. Fuente: Elaboración propia.	53
6.19Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.	54
6.20Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.	55
6.21Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.	55
6.22Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.	56
6.23Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.	57
6.24Evolución del número de pasajeros que hacen transbordos en la red de metro. Fuente: Elaboración propia.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

6.25 <i>Data frame que almacena los trenes existentes en la red de metro. Fuente: Elaboración propia.</i>	59
6.26 <i>Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.</i>	60
6.27 <i>Número medio de pasajeros que suben en cada estación de la línea 6. Fuente: Elaboración propia.</i>	60
6.28 <i>Número medio de pasajeros que suben a los trenes en cada estación de la línea 10. Fuente: Elaboración propia.</i>	61
6.29 <i>Número medio de pasajeros que bajan en cada estación de la línea 6 a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración propia.</i>	62
6.30 <i>Número medio de pasajeros que bajan en cada estación de la línea 10 a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración propia.</i>	63
6.31 <i>Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.</i>	64
6.32 <i>Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.</i>	65
6.33 <i>Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.</i>	66
6.34 <i>Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.</i>	66
6.35 <i>Número medio de pasajeros que suben en cada línea por tipo de horario. Fuente: Elaboración propia.</i>	67
6.36 <i>Número medio de pasajeros que bajan en cada línea por tipo de horario. Fuente: Elaboración propia.</i>	68
6.37 <i>Ocupación media de los trenes en las líneas 6 y 10. Fuente: Elaboración propia.</i>	69
6.38 <i>Evolución del número de transbordos entre la línea 6 la 10 a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración propia.</i>	70
B.1. <i>Listado de las estaciones de la línea 6 numeradas. Fuente: Elaboración propia.</i>	86
B.2. <i>Listado de las estaciones de la línea 10 numeradas. Fuente: Elaboración propia.</i>	87
C.1. <i>Representación de la estación de Laguna. Fuente: albertguillaumes.</i> .	90
C.2. <i>Representación de la estación de Carpetana. Fuente: albertguillaumes.</i> .	91
C.3. <i>Representación de la estación de Oporto. Fuente: albertguillaumes.</i> .	92
C.4. <i>Representación de la estación de Opañel. Fuente: albertguillaumes.</i> .	92
C.5. <i>Representación de la estación de Plaza Elíptica. Fuente: albertguillaumes.</i> .	93
C.6. <i>Representación de la estación de Usera. Fuente: albertguillaumes.</i> .	93
C.7. <i>Representación de la estación de Legazpi. Fuente: albertguillaumes.</i> .	94
C.8. <i>Representación de la estación de Arganzuela-Planetario. Fuente: albertguillaumes.</i> .	94
C.9. <i>Representación de la estación de Méndez Álvaro. Fuente: albertguillaumes.</i> .	95
C.10 <i>Representación de la estación de Pacífico. Fuente: albertguillaumes.</i> .	96

ÍNDICE DE FIGURAS

C.11 Representación de la estación de Conde de Casal. Fuente: albertguillaumes.	96
C.12 Representación de la estación de Sainz de Baranda. Fuente: albertguillaumes.	97
C.13 Representación de la estación de O'Donnell. Fuente: albertguillaumes.	98
C.14 Representación de la estación de Manuel Becerra. Fuente: albertguillaumes.	99
C.15 Representación de la estación de Diego de León. Fuente: albertguillaumes.	100
C.16 Representación de la estación de Avenida de América. Fuente: albertguillaumes.	101
C.17 Representación de la estación de República Argentina. Fuente: albertguillaumes.	101
C.18 Representación de la estación de Nuevos Ministerios. Fuente: albertguillaumes.	102
C.19 Representación de la estación de Cuatro Caminos. Fuente: albertguillaumes.	103
C.20 Representación de la estación de Guzmán el Bueno. Fuente: albertguillaumes.	103
C.21 Representación de la estación de Vicente Aleixandre. Fuente: albertguillaumes.	104
C.22 Representación de la estación de Ciudad Universitaria. Fuente: albertguillaumes.	104
C.23 Representación de la estación de Moncloa. Fuente: albertguillaumes.	105
C.24 Representación de la estación de Argüelles. Fuente: albertguillaumes.	106
C.25 Representación de la estación de Príncipe Pío. Fuente: albertguillaumes.	107
C.26 Representación de la estación de Puerta del Ángel. Fuente: albertguillaumes.	107
C.27 Representación de la estación de Alto de Extremadura. Fuente: albertguillaumes.	108
C.28 Representación de la estación de Lucero. Fuente: albertguillaumes.	108
C.29 Representación de la estación de Hospital Infanta Sofía. Fuente: albertguillaumes.	109
C.30 Representación de la estación de Reyes Católicos. Fuente: albertguillaumes.	110
C.31 Representación de la estación de Baunatal. Fuente: albertguillaumes.	110
C.32 Representación de la estación de Manuel de Falla. Fuente: albertguillaumes.	111
C.33 Representación de la estación de Marqués de la Valdavia. Fuente: albertguillaumes.	111
C.34 Representación de la estación de La Moraleja. Fuente: albertguillaumes.	112
C.35 Representación de la estación de La Granja. Fuente: albertguillaumes.	112
C.36 Representación de la estación de Ronda de la Comunicación. Fuente: albertguillaumes.	113
C.37 Representación de la estación de Las Tablas. Fuente: albertguillaumes.	113

ÍNDICE DE FIGURAS

C.38 <i>Representación de la estación de Montecarmelo. Fuente: albertguillaumes.</i>	114
C.39 <i>Representación de la estación de Tres Olivos. Fuente: albertguillaumes.</i>	114
C.40 <i>Representación de la estación de Fuencarral. Fuente: albertguillaumes.</i>	115
C.41 <i>Representación de la estación de Begoña. Fuente: albertguillaumes.</i>	115
C.42 <i>Representación de la estación de Chamartín. Fuente: albertguillaumes.</i>	116
C.43 <i>Representación de la estación de Plaza de Castilla. Fuente: albertguillaumes.</i>	117
C.44 <i>Representación de la estación de Cuzco. Fuente: albertguillaumes.</i>	117
C.45 <i>Representación de la estación de Santiago Bernabéu. Fuente: albertguillaumes.</i>	118
C.46 <i>Representación de la estación de Gregorio Marañón. Fuente: albertguillaumes.</i>	118
C.47 <i>Representación de la estación de Alonso Martínez. Fuente: albertguillaumes.</i>	119
C.48 <i>Representación de la estación de Tribunal. Fuente: albertguillaumes.</i>	120
C.49 <i>Representación de la estación de Plaza de España. Fuente: albertguillaumes.</i>	120
C.50 <i>Representación de la estación de Lago. Fuente: albertguillaumes.</i>	121
C.51 <i>Representación de la estación de Batán. Fuente: albertguillaumes.</i>	121
C.52 <i>Representación de la estación de Casa de Campo. Fuente: albertguillaumes.</i>	122
C.53 <i>Representación de la estación de Colonia Jardín. Fuente: albertguillaumes.</i>	122
C.54 <i>Representación de la estación de Aviación Española. Fuente: albertguillaumes.</i>	123
C.55 <i>Representación de la estación de Cuatro Vientos. Fuente: albertguillaumes.</i>	123
C.56 <i>Representación de la estación de Joaquín Vilumbrales. Fuente: albertguillaumes.</i>	124
C.57 <i>Representación de la estación de Puerta del Sur. Fuente: albertguillaumes.</i>	125

Capítulo 1

Introducción

La modelización y la simulación, también conocidas como M&S, conforman una disciplina que se basa en la representación aproximada del mundo real. Para poder llevar a cabo una representación adecuada, primero, es fundamental, crear un modelo que aproxime el hecho u objeto de la vida real sobre el que se quiere trabajar. A continuación, se procederá con la realización de una simulación que permitirá observar el comportamiento del evento ante diferentes circunstancias y variables para, finalmente, analizar los datos obtenidos y alcanzar las conclusiones pertinentes. La simulaciones hacen posible la creación de hipótesis y su demostración a través de la repetición de pruebas [1] [2].

Una simulación se puede llevar a cabo a diferentes niveles de abstracción empleando, desde un modelo que disponga tan solo del esqueleto base del evento o cosa a representar, pasando por una modelización más detallada, hasta llegar, incluso, a una copia prácticamente exacta del objeto de la vida real que contenga todos y cada uno de los detalles, percepciones y variables que lo envuelven tanto a él como a su entorno.

1.1. Motivación

La metodología de la modelización y la simulación cuenta con una gran relevancia y su utilidad en la actualidad presenta un importante crecimiento. En el mundo real, el transporte público supone una pieza indispensable en el mecanismo de movilidad de las grandes ciudades, ya sea, Madrid, Barcelona, Londres, París, etc. Las redes de autobuses, cercanías, metro y metro ligero que se despliegan a lo largo de cientos de calles posibilitan el traslado de miles de viajeros todos los días de una manera más eficiente y menos contaminante que mediante el uso de vehículos privados. La simulación de dichas redes y, en lo que respecta a este proyecto, la representación de un sistema de transporte público tan fundamental como es el Metro de Madrid, y en particular las líneas 6 y 10, permite observar y analizar el comportamiento del entramado ante diferentes escenarios.

La principal motivación a la hora de embarcarse en este proyecto es, sin duda,

Capítulo 1. Introducción

la oportunidad de hacer un análisis de las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid e identificar las diversas áreas de funcionamiento. Se tratará de estudiar algunos de los componentes que conforman la red de metro madrileña y cómo afectan al flujo de pasajeros diario.

La complejidad que albergan estas líneas, que abarcan estaciones clave y conectan diferentes áreas urbanas, requiere que se lleve a cabo una investigación detallada y una simulación realista para comprender su comportamiento bajo diversas condiciones.

Por consiguiente, se plantea la descripción del sistema, el modelo empírico (componentes, variables de estado, parámetros, relaciones, restricciones...), la modelización matemática de la simulación de eventos discretos y el diseño e implementación en un modelo computacional.

La definición de varios experimentos de y su ejecución a través diferentes prototipos evolutivos proporcionará datos que posteriormente serán analizados de manera exploratoria y permitirá tanto constantes validaciones y verificaciones del modelo como estimaciones de parámetros de rendimiento que caracterizan los resultados.

1.2. Alcance

El Trabajo de Fin de Grado se comenzará llevando a cabo una contextualización del proyecto a través de una investigación concienzuda en torno al ámbito del sistema del Metro de Madrid, haciendo hincapié en las líneas de estudio, las líneas 6 y 10. A continuación, se procederá con la modelización del sistema. En términos generales, las simulaciones de este tipo se pueden tratar de manera similar a como se haría con fenómenos de tipo estocástico, es decir, un modelo matemático estocástico o aleatorio que describe cómo una serie de variables aleatorias se ven modificadas y alteradas a lo largo de un período de tiempo. El caso que ocupa este proyecto es un ejemplo perfecto de estos sistemas dado que se puede analizar el comportamiento y el flujo de las líneas y los trenes en base a factores aparentemente aleatorios, como puede ser el número de pasajeros que llegan o las incidencias que pueden ocurrir. No obstante, también existen variables de tipo determinista a tener en cuenta, como pueden ser los horarios de los trenes. Todas estas entidades, procesos y relaciones claves del sistema serán representadas en un modelo conceptual.

A la parte conceptual le seguirán los modelos empírico y matemático, en los que se describirá el funcionamiento del sistema de una manera sencilla basada en datos y apoyada en gráficas y de una forma más técnica basada en fórmulas matemáticas, respectivamente. Para terminar, se dará inicio a la codificación del programa y se llevarán a cabo diversas fases de pruebas para poder comprobar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado. Durante la realización del proyecto se obtendrán varios prototipos del sistema al que se le irán implementando mejoras gradualmente para, finalmente, lograr un programa completo con el que poder hacer un análisis de los datos que se obtengan a partir de distintas simulaciones con diversos escenarios.

1.3. Objetivos

El objetivo primordial del proyecto es lograr un programa que permita simular de forma realista el funcionamiento de dichas líneas, teniendo en cuenta una amplia gama de variables como las vías, el número de trenes en circulación, las estaciones, los diferentes accesos existentes, la ubicación por zonas, los horarios, el número y flujo de viajeros, la ubicación etc.

Los objetivos más concretos que se han planteado para este proyecto son los siguientes:

- Identificación y definición del problema: desarrollo incremental por prototipos de un sistema de simulación.
- Definición de requisitos: estructuras de datos para las redes de transporte, planificación del tráfico de trenes, flujo de viajeros y medidas de rendimiento, etc. Sistema de fichero de *log* para recopilar y analizar los datos de la simulación.
- Realización de la simulación de las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid para unas franjas horarias determinadas.
- Análisis de datos obtenidos e identificación de posibles propuestas que mejoren el sistema en próximas actualizaciones del mismo.

1.4. Estructuración del documento

De manera resumida el documento se estructura de la siguiente manera:

- **Capítulo 1. Introducción:** se establece el marco de la metodología de la modelización y la simulación, la motivación, el alcance del proyecto y los objetivos establecidos.
- **Capítulo 2. Estado del Arte:** se detalla de manera precisa el contexto en el que se encuentra la red metropolitana de la ciudad de Madrid, así como, otros aspectos, como la evolución histórica, la importancia socioeconómica, el impacto ambiental...
- **Capítulo 3. Modelización:** compuesta por la parte conceptual, el modelo empírico y el modelo matemático.
- **Capítulo 4. Diseño y Simulación:** cuenta con una descripción del desarrollo del código en base a los prototipos realizados y el funcionamiento de la simulación de las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid.
- **Capítulo 5. Análisis de resultados:** se muestra un resumen de los datos obtenidos junto con gráficas, de los cuales se obtendrán los resultados y conclusiones que se presentarán posteriormente en el capítulo 6.
- **Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras:** en este capítulo se expondrán las conclusiones alcanzadas durante las simulaciones de los diferen-

Capítulo 1. Introducción

tes prototipos y su posible impacto en diferentes contextos, incluyendo lo relacionados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Capítulo 2

Estado del Arte

El Metro de la Comunidad de Madrid conforma una parte fundamental en el día a día de millones de madrileños y visitantes. Desde su construcción, el sistema ha ido evolucionando a lo largo de los años hasta convertirse en la red compleja que es actualmente y que se extiende bajo la superficie de cientos de calles y carreteras de la ciudad. El sistema sirve conexión entre multitud de barrios, pueblos y municipios haciendo que el desplazamiento sea cada vez más eficiente. En esta sección del documento se procede a explorar la historia de Metro de Madrid y el gran impacto que supone a nivel económico, social, medioambiental, etc.

2.1. Visión histórica de Metro de Madrid

El Metro de Madrid es una de las redes de transporte público más extensas y antiguas de todo el mundo. El 17 de octubre del año 1919 tuvo lugar la inauguración de la primera línea bajo el reinado de Alfonso XIII. Dicha simple línea más tarde evolucionaría para dar lugar a la basta y compleja extensión de estaciones y uniones subterráneas que es hoy en día Metro de Madrid. Este primer segmento se extendía a lo largo de 3,48 Km y estaba constituido por ocho simples estaciones que trazaban un recorrido entre Sol y Cuatro Caminos. Este trayecto tenía una duración de aproximadamente ocho minutos y recibía el nombre de Línea Norte-Sur. La apertura al público se hizo el 31 de octubre de ese mismo año con un precio de quince céntimos el recorrido. Hasta ese día la población de la capital española se trasladaba, principalmente, a través de carruajes tirados por caballos [3].

A pesar de todo, este no fue ni mucho menos el primer transporte público del que disponía la ciudad de Madrid. En el año 1871 entró en funcionamiento el primer tranvía, tirado por animales de la capital. Con el paso del tiempo, a partir del año 1979 este tipo de maquinarias pasó a utilizar la energía obtenida a través del vapor. Sin embargo, este cambio no fue satisfactorio ya que la población del área metropolitana crecía exponencialmente y estos sistemas se quedaron rápidamente obsoletos. Para tratar de paliar la intensificación del tráfico, Pedro García Faria, un conocido ingeniero de la época, diseñó un proyecto que

Capítulo 2. Estado del Arte

imaginaba un sistema de ferrocarril subterráneo que pudiese transportar tanto personas como mercancías a través de diversas líneas. La propuesta, en un principio muy ambiciosa, finalmente, no llegó a llevarse a cabo, primordialmente debido a la electrificación de los tranvías entre los años 1898 y 1906 y que supuso una revolución en el transporte [4].

La electrificación de los tranvías dio sin duda un respiro a la problemática del tráfico en la ciudad de Madrid. No obstante, la idea presentada inicialmente por Pedro García Faria quedó plasmada en la mente de muchos ingenieros, los cuales consideraban que un sistema con las características descritas en dicho proyecto sería altamente beneficioso, pero sobre todo necesario en el largo plazo. En el año 1913, un grupo de ingenieros compuesto por Antonio González Echarte, Miguel Otamendi y Carlos Mendoza plantearon una nueva iniciativa con un rediseño actualizado del plan original. La propuesta proyectaba una red compuesta por cuatro líneas, con un recorrido de 154 km. Una iniciativa de esta envergadura requería de una financiación muy elevada la cual fue soportada por un lado, en un pequeño porcentaje, por el Banco de Vizcaya con un total de cuatro millones de pesetas.

Por otro lado, el rey de la época, Alfonso XIII, decidió donar parte su patrimonio a la causa, lo que sumó a la recaudación otro millón de pesetas. A raíz de la aportación del monarca, muchos inversores decidieron tomar parte en la iniciativa con lo que se logró alcanzar la cantidad de dinero suficiente como para poder comenzar con el programa, si bien de una manera más simplificada de la que sugería el plano original.

El 24 de enero de 1917, se fundó la Compañía Metropolitana Alfonso XIII a través de la cual se contrató al arquitecto Antonio Palacios Ramil y se le puso a cargo de la construcción de los accesos y las estaciones. En julio de ese mismo año comenzaron las obras. El método elegido para la construcción de las galerías es el método belga, también conocido como método de galería clave. A través de este sistema, se realizaban excavaciones, abriendo las pequeñas galerías del túnel y se cubrían con ladrillos. A continuación, este ensanche se iba haciendo poco a poco cada vez más grande para, finalmente, reforzarlas con un recubrimiento de hormigón. De esta manera, se podía solucionar cualquier problema de inestabilidad, que pudiera aparecer con la excavación [5].

Tras su inauguración el 17 de octubre de 1919, Metro de Madrid comenzó su escalada para convertirse en una de las redes de metro más desarrolladas del mundo. El día 4 de junio de 1924, se abrió al público la línea que recibía el nombre de Sol-Ventas, ya que discurría bajo la calle de Alcalá. Posteriormente, se llevaría a cabo la apertura del ramal Ópera-Estación del Norte, con la cual se lograron solucionar los problemas que causaban las pronunciadas cuestas de la zona y por las cuales no podían funcionar los tranvías. Un dato interesante es que durante los primeros años desde la inauguración, la compañía del metro tan solo contrataba para sus puestos, excluyendo el de conductor del vehículo, a mujeres solteras, bajo el pretexto de que dichas posiciones requerían una dedicación de un gran número de horas.

Con el estallido de la Guerra Civil Española el 17 de julio de 1936, Madrid se

2.1. Visión histórica de Metro de Madrid

convirtió en uno de los objetivos más recurrentes de los ataques. El bando dirigido por el general Francisco Franco tenía como punto principal de conquista la capital, ya que la caída de este territorio supondría una significativa victoria de la guerra. El constante goteo de bombas y disparos hizo que miles de madrileños murieran o se quedaran sin hogar, los cuales quedaban en escombros y cenizas tras los ataques armados. A lo largo de los tres años en los que se extendió el conflicto, la red de túneles y estaciones subterránea del metro se transformó en el hogar y refugio de muchas personas, en los que poder cobijarse ante las incisantes ofensivas.

A pesar de las constantes desgracias, Metro de Madrid no dejó de proporcionar servicio durante este complicado período e incluso se llegó a inaugurar una nueva línea, la 3, el 9 de agosto de 1936. Los vagones fueron empleados para desplazar a los heridos rápidamente hasta localizaciones cercanas a los hospitales y a su vez para trasladar los cuerpos de los fallecidos. Además, el bando republicano empleó ciertas instalaciones a modo de fábrica y depósito de municiones y armamento. Sin lugar a dudas, el constante bombardeo afectó de lleno a la infraestructura y muchos túneles quedaron inutilizados como, por ejemplo, las zonas de Atocha o Sol, puntos estratégicos de la ciudad [6].

Tras la victoria por parte del bando falangista, comandado por el general Francisco Franco, se eliminaron las referencias al antiguo régimen cambiando nombres como, por ejemplo, Gran Vía, que pasó a llamarse José Antonio, en referencia a uno de los líderes fusilado durante la guerra. Tras la finalización de la Guerra Civil Española el 1 de abril de 1939 el paisaje urbanístico y la sociedad comenzaron su escalada hacia la reconstrucción, pasando por un período de posguerra que fue largo y angosto. En el año 1941 se propuso un plan de expansión del metro de la capital, pero no fue hasta diez años más tarde, en 1951, cuando se comenzaron las obras tras la aprobación del Ministerio de Obras Públicas, el cual financiaba el proyecto a la par con la Compañía Metropolitana de Madrid. El ministerio se ocupaba de los fondos necesarios referentes a las infraestructuras y la compañía de la adquisición de los vagones, el mantenimiento del servicio y la explotación comercial del sistema. Estas obras tenían la intención de extender el alcance del transporte hasta una lejanía máxima de 60 km de la capital.

La recuperación económica y social supuso el crecimiento de la población y del flujo en el tráfico, debido a esto, en el año 1967, se propuso un nuevo plan para ampliar la red de metro. Con esta iniciativa en 1974 la distancia recorrida por las líneas de Metro de Madrid llegaban hasta los 64,3 km. Durante estos años, una multitud de factores propiciaron prácticamente la quiebra de la Compañía Metropolitana de Madrid lo que impulsó que a 7 de junio de 1978, el Ministerio de Transporte adquiriera la totalidad del control de la red. Posteriormente, se traspasó la gestión del sistema a la Diputación Provincial y al Ayuntamiento de Madrid para años después, en el 1986, crearse el conocido actualmente como Consorcio Regional de Transportes que controlaría, junto con el Ayuntamiento de Madrid, el subterráneo por completo [7].

Metro de Madrid fue ampliándose y haciéndose cada vez más grande, alcanzando

Capítulo 2. Estado del Arte

en 1983 los 100 km de longitud y los 300 km en 1989. En la actualidad, se han alcanzado los 295 km de recorrido y un total de 328 paradas, conectando puntos de toda la Comunidad de Madrid y llegando incluso a lugares como el aeropuerto internacional Adolfo Suárez Madrid-Barajas [8].

2.2. Evolución de los convoyes

A lo largo de la historia los vagones han ido evolucionando al ritmo que lo ha hecho la tecnología existente. Algunos de los modelos más característicos son [9]:

- Coche Cuatro Caminos: se puso en funcionamiento entre los años 1919 y 1921 y otorgó servicio en las instalaciones del Metro de Madrid durante aproximadamente 70 años. Estos convoyes retirados en 1989 alcanzaban una velocidad máxima de 55 km/h.
- Coche Quevedo: este tren comenzó a transportar pasajeros en 1925 y cumplió su labor durante un corto período de seis años, terminando su funcionamiento en 1931. Estos vehículos se desplazaban a unos 55 km/h y se dispusieron, principalmente, para abarcar las ampliaciones que se dieron en la época en las líneas 1 y 2.
- Coche Salamanca y Bulevares: conocidos por ser la segunda generación de los vagones clásicos, empezaron su servicio en 1945 y alcanzaban una velocidad máxima de 55 km/h. Estos trenes fueron destinados en gran mayoría a recorrer la L4.
- Coche 300 1^a Serie: puesto en funcionamiento en el año 1961 estos nuevos trenes viajaban a una velocidad tope de 70 km/h.
- Coche 1.000 1º Serie: estos trenes fueron incorporados a la red madrileña de transportes en el año 1965. Con una velocidad máxima de 65 km/h, su principal función ha sido recorrer la línea 5, si bien fueron diseñados en un principio para ser utilizados en la L4.
- Coche 1.000 2^a Serie: se trata de una segunda versión del tipo de convoy anterior. Su puesta en funcionamiento fue cuatro años más tarde, en el año 1969, y se movía a una velocidad máxima de 65 km/h. Estos coches transportaban pasajeros, principalmente en las líneas 2 y 5.
- Coche 5.000 1^a Serie: se trata de uno de los tipos de trenes más longevos, ya que fueron inaugurados por primera vez en 1974 y continúan dando servicio a día de hoy. Alcanzan una velocidad máxima de 70 km/h y se trata del primer modelo que se construyó para líneas de gálibo ancho.
- Coche 300 2^a Serie A: son una actualización de los ya mencionados Coche 300 en su primera serie. Comenzaron a funcionar en 1976 y se desplazaban a una velocidad máxima de 75 km/h.
- Coche 2.000 Serie A: este modelo de trenes iniciaron su actividad en el año 1985. Con una velocidad máxima de 65 km/h estos vehículos se vieron

2.2. Evolución de los convoyes

reemplazados por la Serie 3.000 a principios de los años 2000.

- Coche 2.000 Serie B: son una evolución de la serie 2.000 y fueron puestos en funcionamiento en 1997. Tuvieron servicio sustituyendo a los modelos 300 y 1.000 y, al igual que los de la Serie A, fueron sustituidos a principio de los 2000 por la Serie 3.000.
- Coche 6.000 2^a Serie: con una velocidad máxima de 110 km/h, estos trenes comenzaron a dar servicio en el año 1999 y circulan por la línea 9 hasta el día de hoy.
- Coche 7.000: se pusieron en funcionamiento en el 2002 y son conocidos por presentar una configuración denominada como "boa", debido a la falta de separación entre sus vagones. Presentan una velocidad de 110 km/h y a día de hoy siguen prestando servicio en la L7, L9, L10 y L12.
- Coche 8.000: fueron incorporados a la red madrileña entre el 2001 y el 2003 y, al igual que la Serie 7.000, presenta una configuración de "boa". A día de hoy, siguen viajando a su velocidad máxima de 110 km/h a través de una gran cantidad de líneas, más específicamente la 6, 8, 9, 10, 11 y 12.
- Coche 9.000: con una puesta de funcionamiento más reciente entre los años 2006 y 2009, este modelo de trenes con velocidad máxima de 110 km/h y una configuración tipo "boa", presta servicios principalmente a lo largo de la línea 7 aunque también se desplazan en ocasiones por la L9, L10 y L12.
- Coche 3.000: comenzaron a dar servicio entre los años 2006 y 2008, con una velocidad tope de 80 km/h. se trata del primer modelo de vagones que cuentan con una configuración tipo "boa" sin separación entre los mismos que es de gálibo estrecho. A día de hoy, estos vehículos siguen transportando pasajeros a través de las líneas 2, 3, 4, 5 y el Ramal.

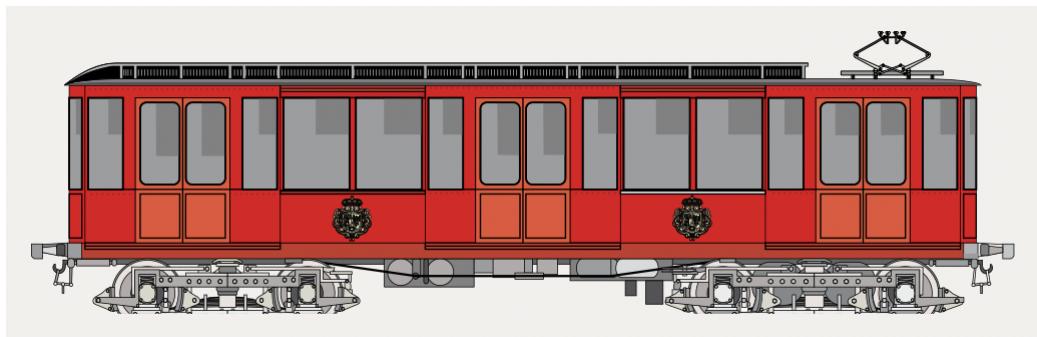


Figura 2.1: Representación del antiguo coche Cuatro Caminos Fuente: crt.m.

Capítulo 2. Estado del Arte

2.3. Impacto cultural, social, económico y medioambiental

Metro de Madrid tiene un significado cultural arraigado en todos los residentes de la región pero que también marca a los visitantes de la ciudad. El sistema es un reflejo de la diversidad y vitalidad de la que goza la vida urbana en Madrid y forma parte de la identidad de la capital. El Metro de Madrid no es tan solo una red de transporte público, sino que se trata de un elemento del centro neurálgico, cultural y social de la ciudad. Como ya se ha podido apreciar anteriormente, a lo largo de su historia ha desempeñado un papel realmente importante en la construcción de Madrid tal y como es hoy en día y en la creación de vínculos entre los habitantes.

El impacto cultural también incluye la arquitectura y el diseño de las estaciones del metro. Muchas de ellas son más que simples puntos de acceso al transporte público, son obras de arte arquitectónicas, diseñadas por renombrados arquitectos y artistas. Desde las estaciones más antiguas y solemnes con sus azulejos y mosaicos hasta las más modernas con sus diseños vanguardistas, el metro de Madrid ofrece una experiencia única que combina funcionalidad y estética.

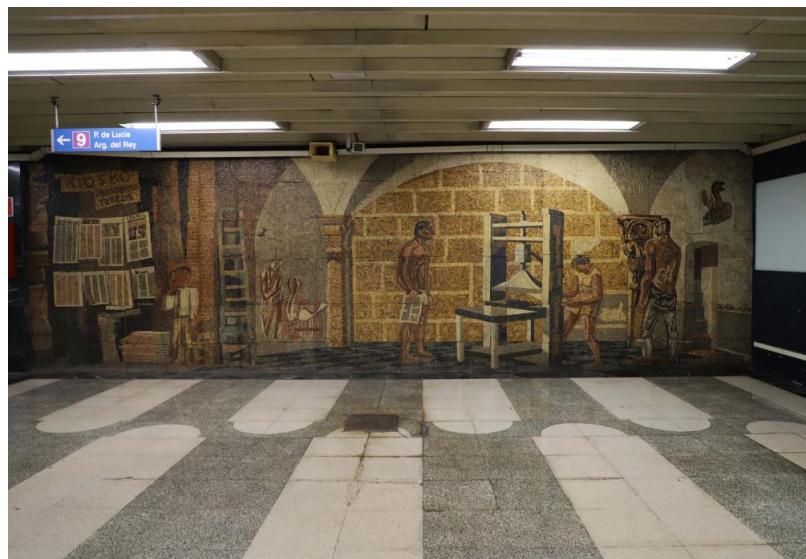


Figura 2.2: Mosaico en estación. Fuente: metromadrid.

Del mismo modo, las estaciones son lugares de encuentro y convivencia donde miles de personas de diferentes orígenes, edades y estilos de vida se cruzan a diario. Además, en muchas de estas zonas se albergan actividades culturales y eventos que fomentan la interacción social y el intercambio cultural entre los usuarios. Adicionalmente, la red de transporte subterráneo de la capital también desempeña un papel fundamental en la preservación del patrimonio histórico y cultural de la ciudad, dado que muchas de las estaciones se encuentran ubicadas en edificios y espacios de interés histórico, que han sido restauradas y adaptadas para su uso como estaciones de metro lo que contribuye a la conser-

2.3. Impacto cultural, social, económico y medioambiental

vación del legado cultural de Madrid.



Figura 2.3: *Entrada a la estación Gran Vía. Fuente: TurismoMadrid*

En lo que respecta al aspecto económico, el sistema posibilita el desplazamiento de trabajadores, estudiantes y turistas a sus respectivos destinos contribuyendo de manera positiva al funcionamiento correcto de la economía. El desplazamiento eficiente de miles de trabajadores impacta en un mejor desarrollo de la jornada laboral y un aumento de la productividad de los empleados. La extensa red del Metro de Madrid conecta los diversos barrios, municipios y áreas metropolitanas de la región, brindando un acceso rápido a una amplia gama de servicios y actividades, como pueden ser centros educativos, centros de salud, áreas comerciales, espacios culturales y de ocio, lo que mejora la calidad de vida de los residentes y aumenta la motivación al gasto. Tan solo en el año 2022 el suburbano cerró el ejercicio con una inversión récord de cerca de 348,40 millones de euros y un total de 3,90 millones de euros en beneficios [10].

Las estaciones de Metro de Madrid se transforman en nodos comerciales realmente importantes que atraen la actividad económica y generan oportunidades de negocio en su entorno. La sola presencia de estaciones de metro cercanas a los edificios aumenta su valor inmobiliario lo que a su vez impacta positivamente fomentando la apertura de comercios, restaurantes y servicios dirigidos a los residentes de dichos espacios.

La red de transporte desempeña un papel clave en el desarrollo del turismo al proporcionar un medio de transporte eficiente y accesible para los visitantes, lo que contribuye al aumento del número personas que eligen Madrid como su destino de vacaciones y, en consecuencia, al desarrollo del sector turístico. Todo esto presenta un impacto positivo en la generación de empleo, la actividad económica y la promoción de la imagen de la región a nivel tanto nacional como internacional.

Para finalizar, en términos medioambientales Metro de Madrid trata de ser un servicio lo más respetuoso con el medio ambiente posible. Para hacer esto una realidad el sistema no hace uso de combustibles fósiles para funcionar, sino que

Capítulo 2. Estado del Arte

presta el servicio fundamentalmente a través de electricidad. Un viaje en metro conlleva una contaminación cuatro veces menor que si se usara un vehículo privado, lo que evita cada año, la circulación de cerca de 79 millones de coches y 14 millones de motos. Además, dado que la red se extiende su gran mayoría bajo tierra, se libera una gran tensión y congestión en el tráfico de la superficie, lo que mejora la calidad del aire de la ciudad.

Asimismo, para tratar de reducir las emisiones contaminantes, se emplean técnicas como la puesta en marcha de una iluminación más eficiente, un gestor inteligente de ventilación o celda reversibles. Primeramente, cuanto a la iluminación eficiente, se han sustituido las antiguas bombillas de las estaciones por nuevas tecnologías de iluminación como la LED, la fluorescencia de alto rendimiento o la inducción. Este tipo de soluciones lumínicas disminuye el consumo en un 50 %, sin que se vea afectado el grado de luminosidad.

En segundo lugar, el empleo de complejos algoritmos, como por ejemplo el avanzado algoritmo de colonias de abejas artificiales, hace que los ventiladores aumenten de manera considerable su eficiencia energética. Cada ventilador se controla de manera individual y en un rango de ocho horas equilibra los parámetros de calidad del aire y el coste energético, decidiendo la mejor programación que se debe configurar.

Por último, con el sistema de celdas reversibles es posible captar la energía de frenado que producen los convoyes y reutilizarla para dar soporte a otros servicios, como pueden ser las escaleras mecánicas, las máquinas expendedoras, los ventiladores, la red iluminación, los ascensores, etc. al mismo tiempo que se evita que aumente la temperatura ambiente de los túneles y las estaciones [11].

Metro de Madrid es mucho más que un sistema de transporte público, es un símbolo de progreso, integración social y cultural y de sostenibilidad que desempeña un papel fundamental en la vida diaria y el futuro de la región. Su historia y significado lo convierten en un elemento indispensable en la vida de los madrileños.

2.4. Simulaciones

La simulación es un campo de gran importancia cuya existencia se remonta a tiempos remotos. La simulación ha transformado la manera en la que los investigadores exploran la forma de la vida. En la actualidad, la simulación es un área de investigación muy activa y que se encuentra en constante desarrollo y evolución. Puede ser utilizada con infinidad de objetivos, algunos de ellos son:

- *Validación de modelos y experimentos:* si un fenómeno de interés puede ser estudiado directamente y se puede obtener información a través de experimentos, se puede utilizar la simulación tanto en el caso de modelos analíticos como experimentales para validar dichos modelos y datos. Como ejemplo, se pueden encontrar la ley de Little o *Little's Law* para explicar el comportamiento del fenómeno de la longitud esperada de las colas, es decir, si se está esperando en una cola en el supermercado entonces la longitud

esperada de dicha cola va a ser siempre igual al ratio medio de velocidad al que el cajero pueda procesar la compra de los clientes multiplicado por el tiempo medio de espera:

$$L = \lambda W$$

siendo L la longitud media de la cola, λ el ratio medio de procesamiento de la compra por parte del cajero y W el tiempo medio de espera. En casos como este, se puede implementar una simulación que movilice el fenómeno para después comparar los resultados con los obtenidos a raíz del modelo analítico. De una manera similar se podría emplear una simulación para validar datos.

- *Soporte de análisis estadísticos*: con una simulación se pueden reproducir experimentos con diferentes entradas o *inputs* para producir una serie de resultados que después deberán ser analizados.
- *Predicción de resultados probables*: las predicciones del tiempo son un ejemplo claro del uso de las simulaciones para la predicción de resultados. Este tipo de modelos suelen ser caóticos, esto es, con pequeñas modificaciones que se hagan en las entradas se producen grandes cambios en los resultados. Si bien es cierto, no todas las simulaciones que se emplean para predicciones presentan sensibilidades tan extremas como las de este caso.

Las simulaciones añaden un aspecto temporal a un modelo describiendo cómo el sistema modelado varía a lo largo del tiempo. Se puede entender entonces una simulación como una representación de un modelo cambiante en el tiempo. Se destacan dos tipos de simulaciones, las referentes a eventos continuos y a eventos discretos [2].

2.4.1. Simulación de eventos continuos

Las simulaciones de eventos continuos se definen como sistemas descritos por variables de estado, que van cambiando de manera continua con respecto al tiempo. Estas variables de estado describen cómo se comporta el sistema. A menudo, las simulaciones continuas se emplean para replicar sistemas que cuentan con elementos eléctricos, mecánicos o hidráulicos. No obstante, cualquier sistema que varía en el tiempo de manera continua podrá ser representado con este tipo de simulaciones [2].

2.4.2. Simulación de eventos discretos

Una simulación de eventos discretos hace referencia a los cambios que sufre un modelo como consecuencia de la acción de unos eventos que ocurren de manera cronológica sobre el mismo. El estado del sistema está compuesto por un conjunto de variables de estado que describen cómo se encuentra en un momento de tiempo determinado. Además, en este tipo de simulaciones se suele emplear un reloj para llevar a cabo la simulación del tiempo y así poder decidir en qué instante se desea que ocurra un suceso concreto [2].

Capítulo 2. Estado del Arte

Para tratar de exemplificar las simulaciones de eventos discretos se va a tomar la simulación de las líneas 6 y 10 de Metro de Madrid que ocupa este proyecto. Cuando un pasajero llega a una estación espera, si el tren no se encuentra ya en ella, a que el convoy haga su aparición para poder subir en él y realizar su desplazamiento hacia otra parada. La llegada del viajero es un evento aleatorio, es decir, que no posee un patrón reconocido. Los eventos aleatorios pueden ser representados mediante distribuciones estadísticas. En el caso dado, la llegada de los pasajeros será representada con una distribución estadística de Poisson que se define de la siguiente manera:

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

siendo con x el número de veces que se repite el proceso y λ el valor esperado.

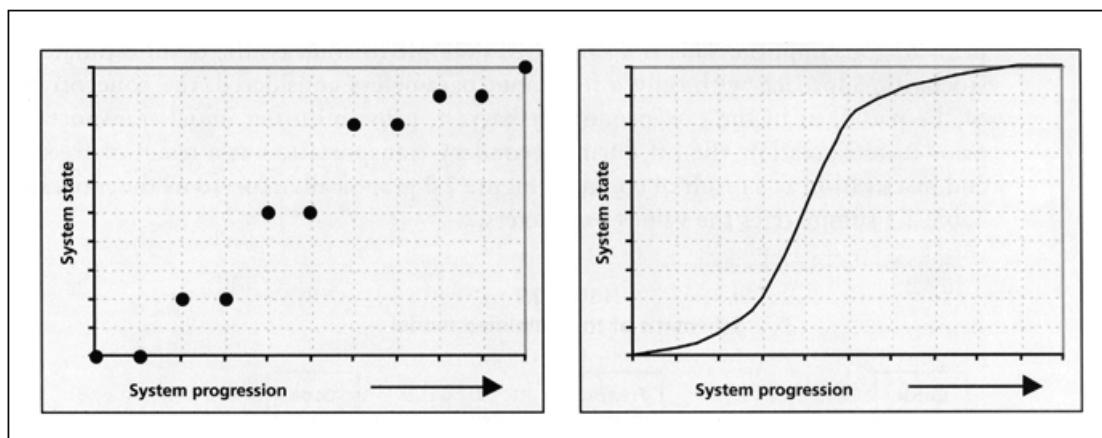


Figura 2.4: Gráfico comparativo de un modelo discreto y continuo. Fuente: fao.org.

Los estados serán discretos si la variable aleatoria puede tomar determinados valores, usualmente números naturales, tal y como se puede apreciar en la imagen izquierda de la Figura 2.4. Por el contrario, en los continuos, las variables aleatorias pueden tomar cualquier valor comprendido dentro de un rango dado que normalmente son los números reales (imagen de la derecha en la Figura 2.4).

Capítulo 3

Modelo empírico

3.1. Descripción

Las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid son dos de las travesías más importantes de la red de transporte subterránea de la ciudad. Sus andenes cuentan con una distancia de entre los 90 y los 115 metros, que permiten un espacio suficiente para la afluencia de pasajeros. A lo largo de las diferentes paradas de las vías se pueden encontrar puestos de gestión y ayuda como las oficinas de Atención al Cliente, las Oficinas de Gestión para las tarjetas de transporte y demás documentos e incluso Bibliometros, un servicio gratuito de préstamos de libros.

El Metro de Madrid cuenta con sistema de seguridad integral que fue implantado de manera oficial en el año 1983 y que se compone de una red de más de 1.570 vigilantes que se distribuyen por todas las estaciones, recintos y trenes que patrullan por equipos y de manera individual todas las instalaciones para asegurar un buen desarrollo de las jornadas. Además, existen más de treinta equipos con vehículos que se desplazan por el exterior de entre las diferentes localizaciones atendiendo las posibles incidencias presentes.

Existe una oficina en la que se revisa el sistema de seguridad de cámaras, más de 10.000 unidades, repartidas por todo el circuito del metro. Desde este punto central se toman las decisiones oportunas en función de las incidencias que ocurran y se da aviso a los guardias de seguridad para que se acerquen al lugar específico en el que se está produciendo un acontecimiento, como un mal funcionamiento de algún dispositivo, el incumplimiento de alguna norma establecida en el Reglamento de Viajeros o en la ley, etc.

Además, es necesario destacar que todo el eslabón de seguridad se mantiene en contacto directo con las fuerzas del orden, tanto a nivel nacional como estatal, por si se diera el caso de que se produjera un incidente que trascendiera a un nivel de riesgo un tanto mayor [12].

Capítulo 3. Modelo empírico

3.1.1. Estaciones

Con carácter general las estaciones del Metro de Madrid son espacios amplios con capacidad para albergar un gran número de viajeros. Estas zonas de espera cuentan con asientos en los que poder descansar y mapas en los que poder localizar las siguientes paradas a la que los viajeros se encuentran en el momento y por las que circularán los trenes variando en función del sentido del andén en el que se localicen.



Figura 3.1: *Elementos de las estaciones.* Fuente: metromadrid.

Además, existen con frecuencia pantallas en las que se presenta el tiempo de espera hasta la llegada del próximo vehículo. En cuanto a los accesos, de forma global suelen darse a través de pasillos con rampas, cintas, escaleras mecánicas y manuales que, con frecuencia, se acompañan de ascensores, para conseguir hacer de las paradas lugares más accesibles para todo el público. A su vez, las entradas disponen de tornos o vallas en las que se debe escanear el billete o pase de acceso, los cuales se pueden obtener en diversas máquinas que se sitúan justo antes de dichos controles. A menudo se pueden encontrar puestos de ayuda al viajero, ya sean presenciales, con personal del metro a disposición o mediante interfonos que te conectan con un corresponsal pulsando un botón.

Cabe destacar que a menudo se pueden encontrar espacios publicitarios con pantallas, así como murales u otras formas de representación artísticas como hilos de música clásica que transforman los espacios en lugares mucho más agradables y apacibles. Si bien es cierto, todas estas descripciones pueden verse afectadas dependiendo de la estación y la línea de la que se trate.

3.1. Descripción

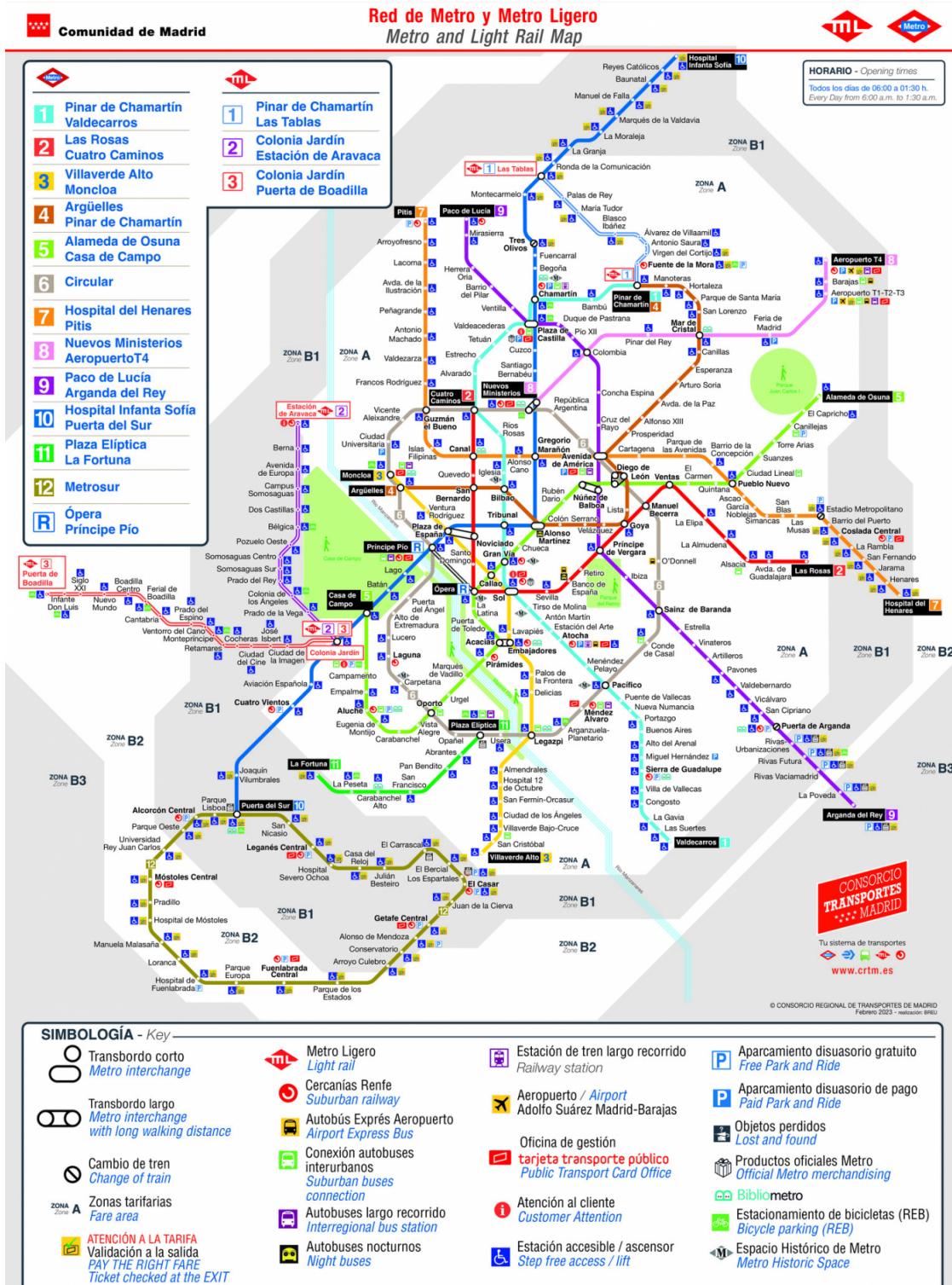


Figura 3.2: Plano del Metro de Madrid. Fuente: redtransporte.

Capítulo 3. Modelo empírico

3.1.2. Trenes

Los convoyes de trenes constituyen los vehículos que se desplazan a lo largo de las líneas, pasando por las diferentes estaciones y cuya función primordial es transportar a los pasajeros de un lugar a otro de la forma más eficiente posible. Con carácter general, las unidades viajan a unas velocidades cercanas a los 100 km/h. Los vagones están equipados con asientos para albergar pasajeros, así como barras centrales y laterales para que las personas puedan viajar de pie sin miedo a caer al suelo por el movimiento del vehículo. Las puertas disponen de un botón o manecilla, que debe ser pulsado o tirada hacia arriba, respectivamente, para abrir las puertas cuando el tren haya llegado a la estación y se encuentre detenido por completo dado que, a diferencia de los convoyes de Renfe, la apertura no es automática.

En el habitáculo interior se dispone de mapas de las líneas por las que circula dicho tren, de pantallas que muestran el destino y la siguiente parada y de información de referencia de seguridad que explica detalladamente los pasos a seguir en caso de emergencia, como el uso de los extintores o las palancas que fuerzan la apertura de las puertas, entre otras cosas. Cabe mencionar que dependiendo del modelo de tren los diferentes elementos mencionados pueden variar.

En lo que respecta a la capacidad y velocidad de los trenes que circulan por las líneas 6 y 10, por la primera suelen desplazarse los modelos Serie 5.000 a una velocidad de 70 km/h y que cuentan con una capacidad técnica de 384 pasajeros [13], o bien los modelos de la Serie 8.400 (CAF) que alcanzan una velocidad máxima de 110 km/h y que presentan una capacidad técnica de 609 viajeros. En cuanto a la L10, por ella discurren convoyes principalmente de la Serie 8000 (Alstom/CAF) con velocidad máxima y un aforo de 110 km/h y 609 pasajeros, respectivamente [14]. Cabe destacar que también se pueden observar circulando por las estaciones de dicha línea trenes de la Serie 7000 y la Serie 9000 (Ansalobreda), no obstante, estas dos últimas configuraciones se encuentran en retirada.



Figura 3.3: *Interior de un vagón de metro estándar. Fuente: Telemadrid, 2020.*

3.1.3. Personas

Las personas suponen el corazón de la red de Metro de Madrid ya que, al fin y al cabo, si los seres humanos no tuviesen la necesidad de desplazarse y explorar nuevos lugares, este tipo de sistemas jamás se hubieran planteado y construido. Existen diferentes tipos de individuos con diferentes clasificaciones dependiendo del uso que hagan del servicio:

- Pasajeros: se trata de la categoría de personas para las cuales se diseñó la red de transporte y que a su vez forman parte del complejo sistema. Los pasajeros toman viajes de una estación a otra a través de los convoyes de metro y se mueven alrededor del subterráneo haciendo uso de las instalaciones en su totalidad.
- Personal: los individuos dentro de esta clasificación forman parte de los componentes de Metro de Madrid y sin ellos la red no podría funcionar.
 - Seguridad: los empleados de seguridad se encargan del bienestar de los pasajeros y de las instalaciones, prestando atención a cualquier acontecimiento que pueda causar una perturbación en el ambiente. Como ya se ha mencionado anteriormente, estos se distribuyen por todas las distintas estaciones, recintos y trenes existentes patrullando para asegurar un buen desarrollo de las jornadas.
 - Limpieza: se trata sin duda de otro de los elementos imprescindibles. El personal de limpieza mantiene la salubridad de todas las instalaciones. Cabe destacar el papel crítico de este sector durante la crisis sanitaria de la COVID-19.
 - Personal de ayuda: localizados principalmente en los puntos de información estos trabajadores, aparte de aportar información casual como pueden ser los horarios, indicaciones de llegada a un punto determinado, etc., son de vital importancia sobre todo para aquellos viajeros que pueden presentar algún tipo de discapacidad, ya que siempre se encontrarán al otro lado de los interfonos pendientes de cualquier necesidad que surja.
 - Técnicos: encargados del mantenimiento y reparación de todo tipo de elementos de la red, desde pantallas hasta los propios trenes, el personal técnico trata siempre de ofrecer soluciones lo más rápido posible para evitar el malestar de los pasajeros.

Capítulo 3. Modelo empírico

3.2. Línea 6

La construcción de esta línea tuvo como objetivo principal obtener un recorrido que permitiera a los usuarios poderse manejar a lo largo de toda la zona central de la ciudad de Madrid. Se trata de una red que, debido a la gran cantidad de desniveles que presenta el área geográfica, tuvo que construirse a una gran profundidad, llegando incluso a alcanzar los 45 metros bajo tierra en la estación de Cuatro Caminos -lo que equivale a un edificio de unos quince pisos- [15].

La línea 6 es la que mayor número de usuarios presenta de toda la red. En el año 2023 contó con un total de 110 millones de usuarios y una frecuencia media de distintas 618.000 personas diarias. Esta línea es una de las dos líneas circulares que existen dentro del Metro de Madrid, siendo la otra, la línea 12. La línea 6 rodea el centro de la ciudad y sirve de interconexión entre las 28 estaciones que la componen, contando con una infraestructura que se extiende durante 23 kilómetros de distancia [16].

Las estaciones que componen dicha línea son: Laguna, Carpetana, Oporto, Opañel, Plaza Elíptica, Usera, Legazpi, Arganzuela-Planetario, Méndez Álvaro, Pacífico, Conde de Casal, Sainz de Baranda, O'Donnell, Manuel Becerra, Diego de León, avenida de América, República, Argentina, Nuevos Ministerios, Cuatro Caminos, Guzmán el Bueno, Vicente Aleixandre, Ciudad Universitaria, Moncloa, Argüelles, Príncipe Pío, Puerta del Ángel, Alto de Extremadura y Lucero [17].

Dado que se trata de un número de terminales demasiado alto como para describir todas en esta sección del documento, se han seleccionado cuatro a nivel representativo. La extensión completa se puede encontrar en el Anexo C.1.

- Avenida de América: se trata de uno de los intercambiadores más importantes de la red de transportes madrileña. Esta estación de la Zona A localizada entre los distritos de Chamartín y Salamanca, bajo las calles de Francisco Silvela, María de Molina y Príncipe de Vergara, fue inaugurada el 26 de marzo de 1973 con la línea 4, aunque no ha parado de actualizarse hasta hoy en día.

En este intercambiador confluyen con la línea 6, la 4, la 7 y la 9, además de contar con correspondencia con autobuses urbanos, interurbanos y autobuses de largo recorrido. Todas las líneas presentan dos andenes, en el caso de las 6, con dirección a Diego de León y República Argentina. Presenta accesos por Avenida de América pares e impares, por Pedro de Valdivia y un acceso independiente por ascensor.

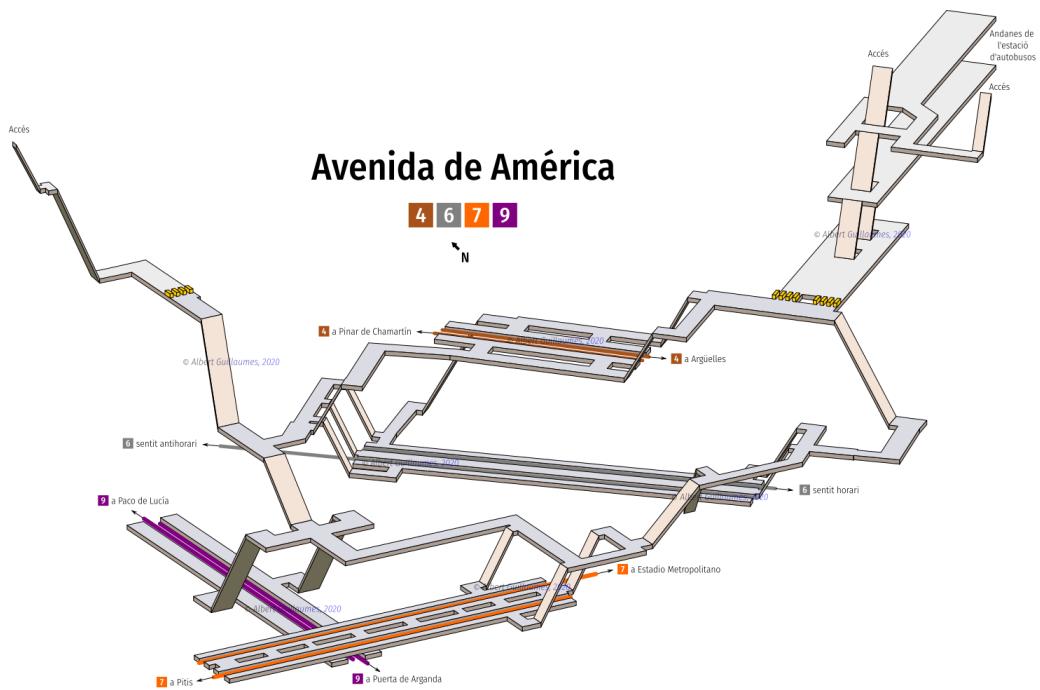


Figura 3.4: Representación de la estación de Avenida de América. Fuente: albert-guillaumes.

- Nuevos Ministerios: es otro de los intercambiadores de referencia del transporte en Madrid. Se encuentra situado entre los distritos de Chamberí, Tetuán y Chamartín en la Zona A bajo los Nuevos Ministerios en el cruce del paseo de la Castellana, Raimundo Fernández Villaverde y Joaquín Costa.

Perteneciente a la red de Cercanías de Madrid, si bien esta estación fue inaugurada en 1967, no fue hasta el año 1979 que el Metro de Madrid llegó a la misma con la línea 6.

En la actualidad, en este espacio confluyen las líneas 6, 8 y 10 de metro con la C1, C2, C3, C4, C7, C8, C8a y C10 de Renfe. Los andenes de la línea 6 tienen dirección Cuatro Caminos y República Argentina. Existen accesos por Agustín de Bethancourt, Orense, el Paseo de la Castellana pares e impares, por el centro comercial del Corte Inglés; además de diversos accesos a través de las entradas de cercanías.

Capítulo 3. Modelo empírico

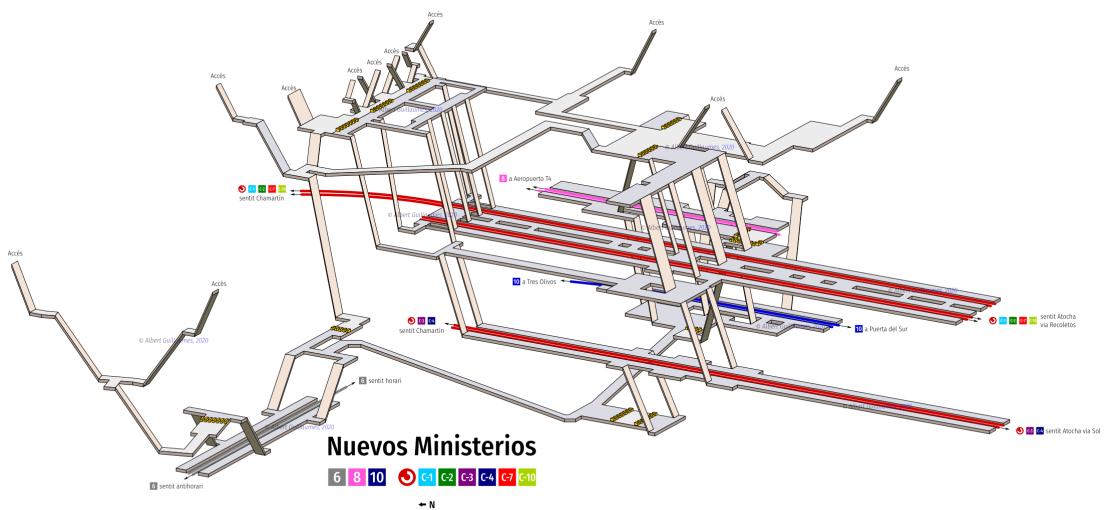


Figura 3.5: Representación de la estación de Nuevos Ministerios. Fuente: albertguillaumes.

- Cuatro Caminos: abierta al público el 17 de octubre de 1919 y con diferentes ampliaciones a lo largo de los años, esta estación de la Zona A del distrito Chamberí/Tetuán se extiende bajo la glorieta de Cuatro Caminos. En ella confluyen las líneas 1 y 2 de metro, además de la 6. Esta última con dos andenes laterales, dirección, Guzmán el Bueno y Nuevos Ministerios.

Al tratarse de una estación muy concurrida, se han construido un total de seis accesos: Reina Victoria (pares e impares), Santa Engracia, Bravo Murillo, Maudes y un ascensor exterior por la calle Santa Engracia.

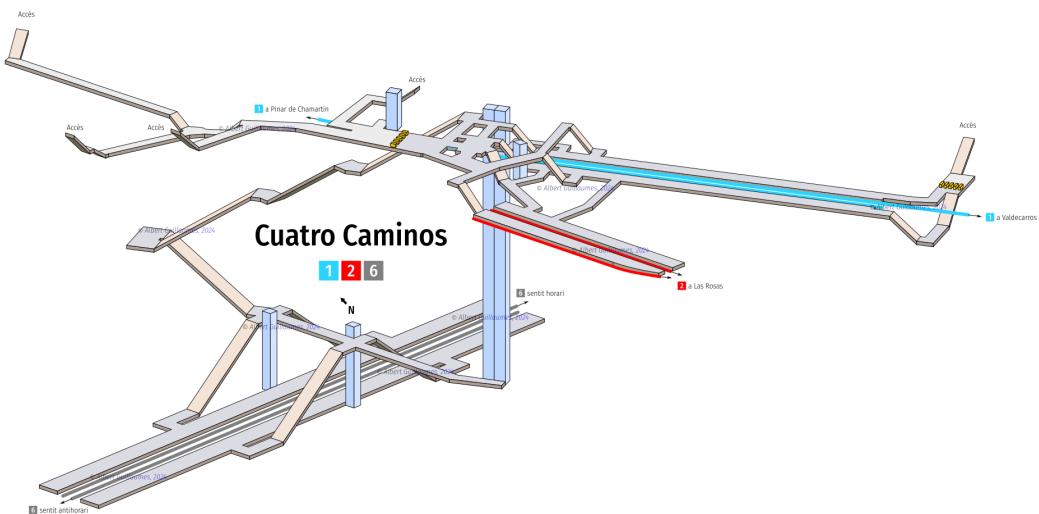


Figura 3.6: Representación de la estación de Cuatro Caminos. Fuente: albertguillaumes.

- Moncloa: se trata de otro de los intercambiadores importantes dentro de la red de transportes de la Comunidad de Madrid y que se localiza en la Zona A, en el distrito Moncloa-Aravaca/Chamberí. Esta estación que se extiende bajo la calle Princesa y la plaza de la Moncloa sirve de interconexión entre las líneas 3 y 6 de metro y autobuses urbanos e interurbanos.

La línea 6 cuenta con dos andenes dirección Argüelles y Ciudad Universitaria. Al tratarse de un intercambiador con un gran número de usuarios, existen multitud de accesos: Arcipreste de Hita, terminal de autobuses-isla 1, Princesa (pares e impares), intercambiador Ejército del Aire, paseo de Moret, Fernández de los Ríos y un acceso por ascensor frente a la Junta Municipal.

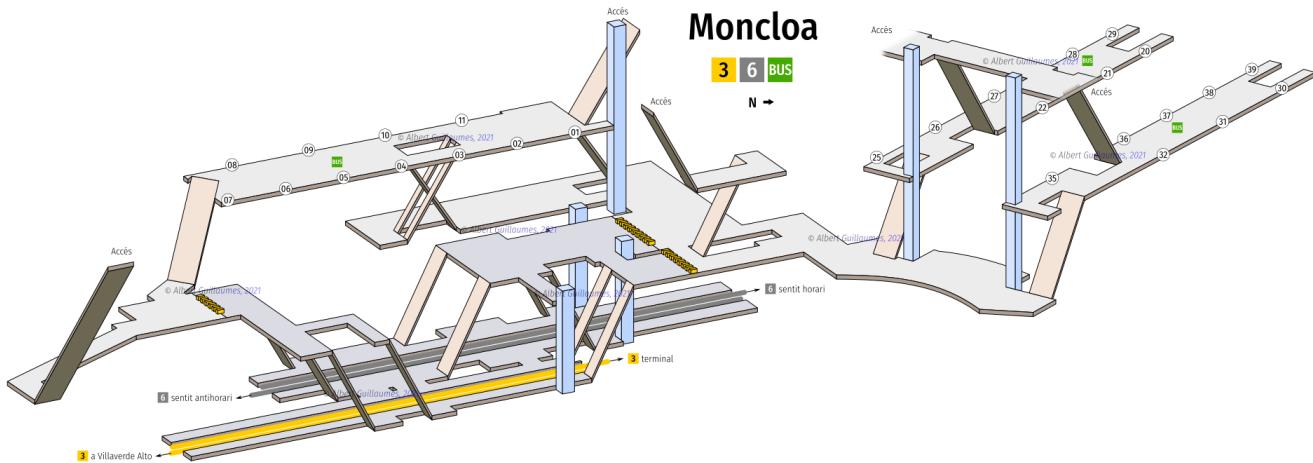


Figura 3.7: Representación de la estación de Moncloa. Fuente: albertguillaumes.

3.3. Línea 10

Con la función principal de permitir conexiones con, practicante, la totalidad de las líneas del Metro de Madrid, la 10 es la tercera línea que mayor número de usuarios presenta de toda la red, contando en 2023 con cerca de 79 millones de usuarios [18]. Este recorrido en forma de recta atraviesa en diagonal a la circular L6 y se extiende de norte a suroeste, desde San Sebastián de los Reyes a Alcorcón, y sirve de interconexión entre las 31 estaciones que la componen. Cuenta con una infraestructura que recorre cerca de 36,5 kilómetros de distancia desde el inicio al final del circuito. Además, es la única línea de transporte del Metro de Madrid cuyas cabeceras se localizan fuera del término municipal de la capital [19].

Las estaciones que componen la L10 son: Hospital Infant, Sofía, Reyes Católicos, Baunatal, Manuel de Falla, Marqués de la Valdavia, La Moraleja, La Granja, Ronda de la Comunicación, Las Tablas, Montecarmelo, Tres Olivos, Fuencarral, Begoña, Chamartín, Plaza de Castilla, Cuzco, Santiago Bernabéu, Nuevos Minis-

Capítulo 3. Modelo empírico

terios, Gregorio Marañón, Alonso Martínez, Tribunal, Plaza de España, Príncipe Pío, Lago, Batán, Casa de Campo, Colonia Jardín, Aviación Española, Cuatro Vientos, Joaquín Vilumbrales y Puertas del Sur [20].

Al igual que sucede con la línea 6, dado que se trata de un número de paradas demasiado elevado como para describir todas en esta sección del documento, se han seleccionado cuatro a nivel representativo. La extensión completa se puede encontrar en el Anexo C.2.

- Chamartín: localizada en el distrito de Chamartín, se encuentra debajo del complejo de estaciones de Chamartín, proporcionando conexiones a la L1 de metro, además de la L10, a los trenes de Cercanías y a autobuses interurbanos. Inaugurada en 10 de junio de 1982, cuenta con dos andenes uno hacia la estación de Begoña y otra hacia la de Plaza de Castilla. En cuanto a los accesos, se puede entrar por Chamartín (con ascensor), por el corredor de acceso a las vías de Cercanías y por el vestíbulo de Renfe, a través de Agustín de Foxá y Pío XII.

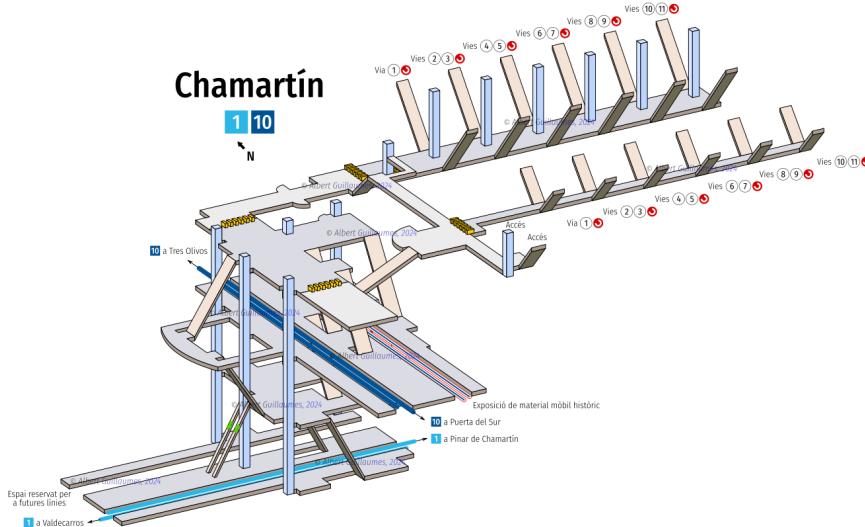


Figura 3.8: Representación de la estación de Chamartín. Fuente: [albertguillau-mes](#).

- Tribunal: se ubica en el distrito de Centro en la Zona A, bajo la intersección de las calles de Fuencarral y Barceló. Fue inaugurada por Alfonso XIII en 1919, si bien los andenes de la L10 no se abrieron hasta 1981. Sirve de interconexión entre la L1 y L10 y presenta dos andenes y dos vías de metro que circulan en dirección a las estaciones de Alonso Martínez y Plaza de España.

Esta estación tiene tres accesos, uno en la calle de Fuencarral, otro en la calle de Barceló a través de un ascensor y un último por el vestíbulo del Tribunal de Cuentas.

3.3. Línea 10

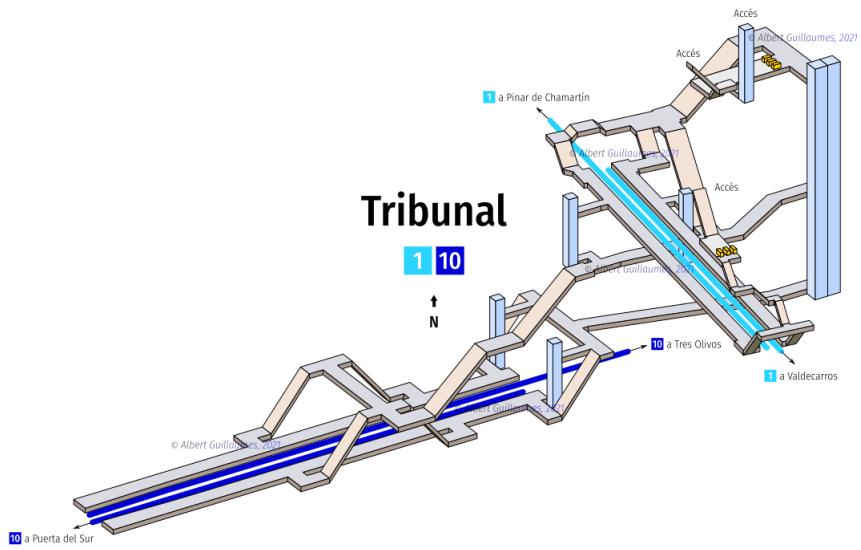


Figura 3.9: Representación de la estación de Tribunal. Fuente: albertguillaumes.

- Plaza de España: localizada en el distrito de Centro/Moncloa-Aravaca, la parada fue inaugurada en 1925 con la L2 y la correspondencia a la L10 en el año 1961. Cuenta con tres andenes dada su confluencia con la línea 3 y dos vías de metro que se dirigen a las estaciones de Tribunal y Príncipe Pío. Cabe destacar que a través de esta estación se puede acceder a la parada de Noviciado de la L2. Además, posee seis accesos: Leganitos, Coliseum, Reyes, Princesa, Plaza de España (con ascensor) y a través de la Plaza del Conde de Toreno (únicamente por medio de ascensor).

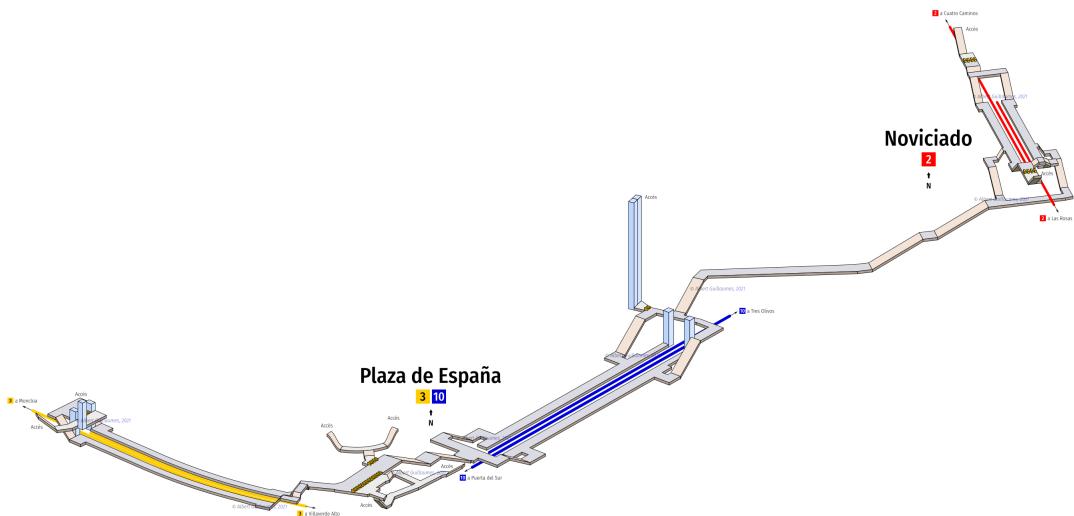


Figura 3.10: Representación de la estación de Plaza de España. Fuente: albertguillaumes.

Capítulo 3. Modelo empírico

- **Príncipe Pío:** localizada en el distrito de Moncloa-Aravaca/Centro, se encuentra delimitada por la glorieta de San Vicente, el paseo de la Florida, la Cuesta de San Vicente y el paseo del Rey. Esta estación, cuya tarifa corresponde a la Zona A, pero que realmente se encuentra en la Zona 0, fue inaugurada en el año 1861 con una construcción muy simple y fue evolucionando a lo largo de las décadas. Se trata de una intermodal que cuenta con conexiones a trenes de autobuses urbanos y de largo recorrido, Cercañas (C1, C7 y C10) y las líneas 6 y R (Ramal, que conecta Príncipe Pío y Ópera), además de la L10. El andén de la línea 6 cuenta con una dirección Argüelles y otro a Puerta del Ángel, en el caso de la L10 son en dirección Plaza de España y Lago. Cuenta con cinco accesos repartidos en la estación Príncipe Pío, todos con accesibilidad.

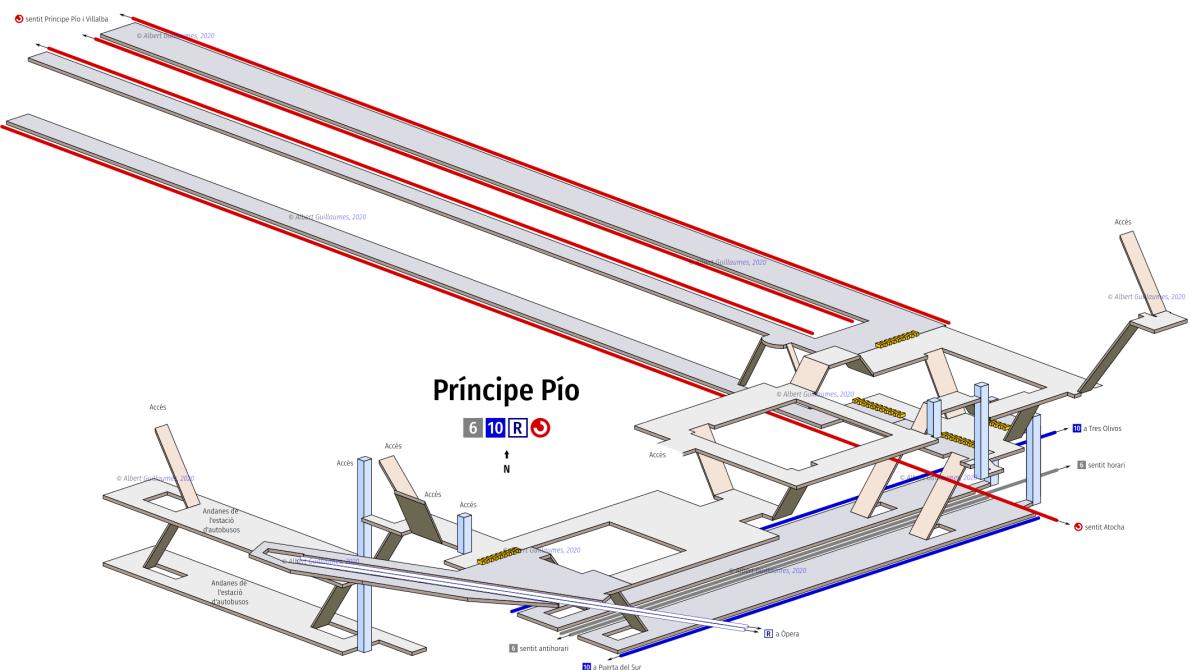


Figura 3.11: Representación de la estación de Príncipe Pío. Fuente: albertguillau mes.

Capítulo 4

Modelo matemático

El modelo matemático del sistema se conforma en función de las variables que se decidan estudiar. En este trabajo de simulación el agente principal es el flujo de pasajeros y la frecuencia de trenes.

Para poder llevar a cabo la reproducción del tránsito de los usuarios por las diferentes líneas y estaciones a través de los trenes y sus subidas y bajadas se va a emplear la distribución de Poisson, de la que ya se ha hablado anteriormente en este documento.

La función de probabilidad de Poisson se materializa en la siguiente fórmula:

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

siendo con x el número de veces que se repite el proceso y λ el valor esperado.

A través de la función preprogramada de R que ejecuta la distribución dando un valor de λ , se procederá a calcular el flujo de pasajeros, simulando valores aleatorios de usuarios que se subirán a los trenes y se bajarán de los mismos, entrando y saliendo de las estaciones. Con esta función se logra que tanto la simulación de la llegada y subida de pasajeros, así como la bajada y salida de las estaciones constituyan un proceso estocástico.

Una vez se tiene la manera en la que se va a tratar la representación del agente principal, se deben analizar todas aquellas variables que afectarán de manera directa a dicho parámetro. Estos elementos son la ubicación de las estaciones y la franja horaria del día en la que se encuentre el sistema.

En primer lugar, en lo que respecta a la localización de las paradas, se deben separar dos casos, el de aquellas estaciones que se sitúan en la Zona A, más cercanas al epicentro de la capital española, y las que están construidas en la Zona B1, en las periferias de la misma. La distribución por áreas se puede apreciar en la Figura 3.2 del apartado 3.1.1. Por un lado, en cuanto a las estaciones situadas en la primera área, se ha dispuesto que, al tratarse de sectores más

Capítulo 4. Modelo matemático

cercanos al centro de la ciudad, habrá un flujo de pasajeros superior al de aquellos lugares que se encuentren a las afueras. Por norma general, a medida que se aleja la atención de las zonas céntricas de Madrid y a cuanto mayor distancia se encuentre una localidad, se tiende a encontrar casas más dispersas ya que la mayoría de individuos trabaja en el centro de Madrid y por comodidad prefieren un barrio céntrico, con mejor comunicación. Debido a esto, la densidad de población disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia con la capital.

Cabe destacar que la gran mayoría de las estaciones representadas en la simulación del presente trabajo se encuentran en la Zona A. Mientras que la totalidad de las paradas de la línea 6 están situadas en esta delimitación, la línea 10 consta de nueve, que constituyen, junto con terminales de otros recorridos, la Zona B1.

Por otro lado, como ya se ha comentado, el área delimitado y apodado como B1 representa territorios más alejados del centro de la ciudad de Madrid. A consecuencia de esto, se ha interpretado que el volumen en el tránsito de pasajeros en las estaciones de este apartado es inferior al que se da en las plataformas del sector anterior. Entre las nueve paradas de la línea 10 que se encuentran en este segmento están: Hospital Infanta Sofía, Baunatal, Manuel de Falla, Marqués de Valdavia, La Moraleja, La Granja, Joaquín Vilumbrales y Puerta del Sur.

Para poder modelar el flujo de usuarios se han empleado coeficientes multiplicadores. En función de la línea y la estación concretas que se estén analizando, la variable *lambda* que cuenta con un valor preestablecido por defecto y que se usa para calcular el número de pasajeros que llegan a la estación y que desean subirse a un tren a través de la distribución de Poisson, se multiplica por una constante que incrementará o disminuirá la cifra. De esta forma, se consigue lograr el efecto deseado introduciendo un mayor movimiento de personas en las estaciones más céntricas de la Zona A y un menor tránsito de individuos en las de la Zona B1.

En segundo lugar, en cuanto a las franjas horarias, dependiendo de la hora del día en la que se encuentre la simulación, la circulación de viajeros será diferente. En la realidad, Metro de Madrid cuenta con diversas divisiones a lo largo de la jornada que establecen la frecuencia de trenes dependiendo de si se prevé que vaya a haber un mayor o menor flujo de pasajeros. Con carácter general, desde las 07:30 a las 09:30 de la mañana de los días laborables se considera que es hora punta, coincidiendo con el camino hacia el trabajo de una gran cantidad de la población y, por lo tanto, existe la necesidad de disponer de un gran número de vehículos que recorran las estaciones. Este tipo horario se extiende de manera similar entre las 18:00 y las 20:00 de la tarde, durante las cuales los habitantes de Madrid terminan sus jornadas laborales y retornan a sus hogares [21].

Al igual que ocurre con la ubicación de las estaciones, tal y como hemos visto anteriormente, en este caso también se van a emplear coeficientes multiplicadores que modulen las llegadas, subidas, bajadas y salidas de los usuarios. De acuerdo con toda esta información, en la simulación de este trabajo se va a diferenciar entre un total de tres rangos horarios: “Punta”, “Valle” y “Estándar”.

-
- Punta: en esta franja se diferencian a su vez tres segmentos distintos.
 - Mañana: se extiende, al igual que en la vida real, desde las 07:30 a las 09:30 de la mañana. Durante este período de tiempo, la distribución de Poisson generará viajeros con una *lambda* del doble de magnitud a la normal. En consecuencia, la frecuencia de los trenes también se verá aumentada aunque en un valor algo inferior.
 - Mediodía: este rango se traslada desde las 14:00 a las 16:00 y, si bien la afluencia no es tan abundante como en el horario anterior, se sigue considerando como “Punta” aunque el factor multiplicador de *lambda* no llegará a doblar el valor principal.
 - Tarde: este segmento de tiempo se distribuye desde las 18:00 de la tarde a las 20:00 y es el tramo pico de movimiento de personas. Es por esto por lo que tanto la circulación de usuarios como la frecuencia de los convoyes será superior a la de la hora punta de mañana.
 - Valle: a partir de las 23:00 de la noche hasta el cierre del metro a las 02:00 de la mañana, se considera un horario “Valle”. En estas horas la llegada de pasajeros se ve reducida considerablemente y por la tanto la frecuencia de los trenes se ve disminuida.
 - Estándar: el resto de horarios, es decir, desde la apertura a las 06:00 de la mañana hasta las 07:29, desde las 09:31 hasta las 13:59, desde las 16:01 hasta las 17:59 y desde las 20:01 hasta las 22:59 se aplica un segmento estándar que mantiene el valor de la *lambda* inalterable, esto es, no realizará ningún tipo de producto por una constante.

A continuación, se debe mencionar la existencia de una restricción importante de la capacidad de los convoyes. Como ya se ha podido ver en el apartado 3.1.2 de este documento, los trenes poseen unas ocupaciones máximas distintas en función del tipo de vehículo que se utilice. En el caso dado, se establecerá una constante que figurará como el número máximo de personas que se pueden subir a un tren y que será igual para toda la comitiva que circule tanto por la línea 6 como por la línea 10. En función de este valor, si todos los habitáculos se encuentran completos, los pasajeros que no puedan subirse quedarán a la espera del próximo tren y tendrán preferencia en la subida, dando a entender que como llevan más tiempo esperando en la estación se sitúan en las primeras posiciones para montarse antes que los nuevos individuos que puedan llegar posteriormente a la parada.

Finalmente, se debe tratar la variable ya introducida de la frecuencia de trenes. Este componente funcionará de una manera similar a como lo hace el flujo de viajeros, viéndose modificado y alterado con coeficientes de multiplicación en función de la hora del día, pero plantea una diferencia sustancial y es su creación. Mientras que en el caso de las personas se empleará la distribución de Poisson para su representación, la incorporación de nuevos convoyes en las vías se llevará a cabo mediante el uso de una constante. Esta solución, si bien le restará realismo a la simulación, simplificará un proceso, ya de por sí complejo, y permitirá reducir drásticamente el coste computacional.

Capítulo 4. Modelo matemático

Si se hubiera optado por hacer de la afluencia de trenes el foco principal se podrían haber empleado diversas soluciones. Por un lado, se podría usar, igual que con los usuarios, una distribución de Poisson adecuada para el caso de que los convoyes llegaran a las estaciones de manera independiente y con una tasa constante, ocurriendo de forma aleatoria. Por otro lado, también se podría haber usado una Exponencial, sobre todo en el caso de haber querido modelar los intervalos de tiempo entre las llegadas de los distintos vehículos. Otra distribución es la Normal, si se hubiera querido interpretar que los trenes llegasen con un patrón más regular y con una variabilidad simétrica que se moviera alrededor de un promedio. Por último, así mismo una distribución de tipo *Gamma* hubiera sido adecuada si en el estudio se hubiese querido modelar el tiempo hasta la ocurrencia del enésimo evento, por ejemplo, para modelar el tiempo hasta la llegada de un quinto tren. Estos casos podrían además combinarse empleando Poisson con *Gamma* o Exponencial con Poisson...

Como se puede observar existe un amplio abanico de posibilidades y todo depende de la visión personal y el punto desde el que se quiera abordar la simulación de los eventos.

Todos los puntos principales que se han expuesto en este apartado se irán incorporando gradualmente a lo largo de los distintos prototipos que se crearán.

Capítulo 5

Definición y construcción del modelo de simulación

El proceso de simulación de las líneas 6 y 10 de Metro de Madrid se ha llevado a cabo en varias fases a través de diversos prototipos. Cada uno de los modelos ha evolucionado de tal forma que se han ido incorporando nuevos elementos que hacen del sistema una representación cada vez más compleja y cercana a la realidad. Todas las simulaciones se han desarrollado en el lenguaje R, empleando para ello los entornos de R y RStudio.

5.1. Primer prototipo

En este primer prototipo del sistema se ha llevado a cabo una representación muy básica de la realidad. Esta primera versión cuenta con una sola línea de metro que dispone de ocho estaciones que son recorridas por dos vagones de tren. Los trenes parten de la primera estación y van recorriendo una a una cada una de las ocho paradas en las que se van subiendo y bajando pasajeros. Una vez se llega al último destino, el tren se resetea y comienza de nuevo en la primera estación.

En cuanto a la parte más práctica, el sistema se compone de diversas estructuras siendo dos las de mayor importancia. En primer lugar, para la representación del avance de los trenes se ha empleado una matriz que cuenta con tantas filas como trenes existen y tantas columnas como número de estaciones hay. Esta matriz guarda la posición en la que se localiza cada convoy, rellenando con un “1” la estación en la que está y el resto de huecos con “0”. En segundo lugar, se ha utilizado un *data frame* que almacena toda la información que posteriormente será de utilidad para realizar las estadísticas de la simulación. La información almacenada en dicha estructura será volcada posteriormente en un fichero con formato csv. En esta primera versión los datos que se incluyen son:

- Tren: que indica el número de convoy al que pertenece la información. En este caso tan solo existen dos vehículos, no obstante este apartado cobrará

Capítulo 5. Definición y construcción del modelo de simulación

importancia en futuros prototipos en los que la cifra de trenes aumente considerablemente.

- Estación: establece la estación en la que se encuentra el tren en el ciclo de simulación.
- Pasajeros que suben: con el total de usuarios que han subido al transporte en la estación concreta que se ha especificado anteriormente.
- Pasajeros que bajan: con el total de pasajeros que han bajado del convoy en la estación específica que se ha concretado anteriormente.
- Pasajeros totales: es una variable que alberga el valor del total de pasajeros que han circulado por la línea hasta el momento sin discriminar por tren.

La simulación comienza con un bucle *while* que es utilizado para calcular el estado del sistema en cada momento. El bucle completará una vuelta y avanzará 0,33 minutos, es decir, aproximadamente unos 20 segundos de ciclo. El programa seguirá iterando hasta que se alcancen los 10.080 minutos, lo que corresponde con una simulación que dura unas 168 horas o una semana completa. A continuación, se dispone dentro del bucle *while* una bucle *for* anidado que recorre todos y cada uno de los trenes que hay en el sistema. El cuerpo de la estructura está formado por diversas ramas de condicionales *if-else* que comprueban si un tren se encuentra en la primera estación, en la última o en una parada intermedia.

- Primera estación: en el caso de que el convoy esté en el inicio de la línea, tan solo podrán subirse pasajeros, ya que no habría usuarios dentro del tren para poder bajarse.
- Última parada: si el vagón se haya en la última estación solo se podrán bajar pasajeros.
- Estación intermedia: en cualquier otra parada intermedia, se podrá producir tanto subidas como bajadas de usuarios.

Una vez hecha la distinción entre las posibles paradas, es necesario realizar el movimiento de los trenes y el flujo de pasajeros. Por un lado, el avance entre estaciones se ha dispuesto con la matriz mencionada anteriormente. Es decir, en cada iteración del bucle *for* se mueve el valor “1” que sitúa a los trenes en una determinada parada a la siguiente posición de la matriz.

Por otro lado, en lo que respecta al flujo de pasajeros, como ya se ha comentado en el capítulo 2.4.2. Simulación de eventos discretos, se ha empleado la distribución de Poisson para simular la subida y bajada de personas a los trenes. La fórmula empleada es la que ofrece el propio entorno de R:

$$rpois(n, \lambda),$$

siendo n el número de valores aleatorios que se desean generar y λ la tasa media de ocurrencias de un evento en un intervalo de tiempo, es decir, la cantidad de pasajeros dada que subirán o bajarán en un espacio de tiempo. Para este primer

5.2. Segundo prototipo

prototipo se han dispuesto unos valores de λ aproximados que no tienen por qué representar la realidad fielmente. Para la representación de los usuarios que suben se ha utilizado una cifra de $\lambda = 35$ y para los que bajan de $\lambda = 10$.

5.2. Segundo prototipo

En este segundo prototipo del sistema se ha llevado a cabo una representación un poco más compleja que la realizada en la anterior versión. En este caso, se ha incorporado una segunda línea y se ha dispuesto un total de 28 paradas para la primera (correspondiente con la línea 6) y de 31 para la segunda (línea 10). De esta manera queda conformada la totalidad de las estaciones y los recorridos que se querían simular.

En cuanto a las estructura de datos que se han utilizado, en primer lugar, al igual que ocurría en la primera versión para la representación del avance de los trenes se han empleado dos matrices que cuentan con tantas filas como trenes existen y tantas columnas como número de estaciones hay. Estas matrices guardan la posición en la que se localiza cada convoy, rellenando con un “1” la estación en la que está y el resto de huecos con “0”. La primera estructura guarda los pertenecientes a la línea 6 y la segunda los de la línea 10. Además, se ha empleado un bucle *for* que inicializa en la primera estación el número de vehículos constante que se indica en una variable global.

En segundo lugar, se han dispuesto los posibles transbordos que se pueden realizar entre ambas líneas, para lo que se ha usado un *data frame*. De esta forma, se almacenan en cuatro columnas diferentes la línea origen, la estación origen, la línea destino a la que se cambia al hacer el transbordo y la parada destino a la que se llega perteneciente a la nueva línea. Para simular estos transbordos, se ha construido una función que comprueba si, dada una línea y una estación específicas, existe la posibilidad de realizar un cambio y se ha añadido un nuevo *data frame* que conserva los pasajeros que quieren hacerlo y que quedan a la espera de que pase un tren por la nueva localización. Dado que los datos tratados no conseguían salir de forma adecuada, se ha decidido no incorporarlos en el volcado al archivo .csv.

En lo que respecta al *data frame* de la simulación que contiene la información que será de utilidad para realizar las estadísticas posteriormente, se la han añadido nuevos apartados a los que ya estaban como la línea y la estación en la que se encuentra el tren y el momento de la simulación en la que nos encontramos, es decir, la hora. Para la hora, se ha utilizado la función `as.POSIXct("07:00:00", format = "%H: %M: %S", tz = "UTC")` que formatea las fechas y el tiempo de la simulación. Cabe mencionar, que esta información no se ha conseguido tratar de manera adecuada en este prototipo y queda como tarea pendiente de solucionar para la siguiente versión.

Al igual que se describía en el apartado anterior, la simulación comienza con un bucle *while* que es utilizado para calcular el estado del sistema en cada momento. El bucle completará una vuelta y avanzará 0,33 minutos, es decir, aproximadamente unos 20 segundos de ciclo.minutos El programa seguirá iterando

Capítulo 5. Definición y construcción del modelo de simulación

hasta que se alcancen los 1.440 minutos, lo que corresponde con una simulación que dura aproximadamente un día completo. Como se ha podido apreciar, se ha pasado de simular una semana a un día. Esta resolución ha sido tomada en base a decisiones de diseño que llevaban a que la complejidad del algoritmo supusiera una demora muy alta en el tiempo de simulación. Además, se ha preferido indagar en una visión más completa de lo que ocurre en una jornada, que obtener una visión más generalista tratando una semana de tiempo.

A continuación, dentro del bucle *while* se cuenta con una bucle *for* anidado que se recorre todas las líneas y, a su vez dentro del mismo, otro bucle *for* que trata a cada uno de los trenes que hay en cada matriz. El cuerpo de la estructura sigue estando formado por diversas ramas de condicionales *if-else* que comprueban si un tren se encuentra en la primera estación, en la última o en una parada intermedia. No obstante, en este prototipo se han añadido especificaciones que diferencian entre líneas para disponer los datos en según qué matriz, ya que los trenes de distintos recorridos se almacenan en estructuras diferentes.

Existen dos modificaciones primordiales que se han realizado de acuerdo al caso concreto de estación en la que se encuentre el tren. Si la situación es la de una primera parada, en el caso de que se trate de la línea 6, se ha tenido en cuenta que, al ser un recorrido circular, se debe de tener contar con posibles pasajeros que procedan de la última estación.

Para una comprensión más sencilla del problema, se ha abarcado la situación como una red común que tiene un principio (Laguna) y un final (Lucero). La elección de dichas estaciones no ha seguido ningún propósito especial y podrían haberse escogido otras dos paradas contiguas cualesquiera. Una vez se ha tenido una representación de dicha línea como si fuera una recta, en la rama *if-else* que distingue la primera estación y más en específico la L6, se ha establecido la opción de poder sumar a los viajeros que provienen de la “última” terminal y así cerrar el círculo que conforma esta línea tan particular.

Si el momento en el tiempo lleva al programa a una estación intermedia, además de que se puedan subir y bajar usuarios de estaciones anteriores, se ha incluido la comprobación de la existencia de personas que han hecho un transbordo y que se han quedado esperando en las estaciones correspondientes a la llegada de un tren. Igualmente, se establece una revisión que asegura si la parada intermedia que se está analizando cuenta con posibilidad de hacer un cambio de línea o no. En el caso de que sí exista esa opción, una parte aleatoria del número calculado de viajeros que se bajan del tren, que se sigue obteniendo mediante Poisson, se trasladarán a una nueva localización caminando por los túneles, escaleras y rampas mecánicas y el resto saldrán a la calle y abandonarán la red de metro.

Finalmente, se volcará en un fichero toda la información de los ciclos de simulación organizados por columnas para mayor facilidad a la hora de analizar los datos y crear gráficos. En este segundo prototipo se disponen la línea, el tren, la estación en la que está, el número de pasajeros que suben y que bajan, el volumen de viajeros totales y la hora, está última con un formato inadecuado que no termina de tener un propósito, tal y como ya se ha mencionado anteriormente.

5.3. Tercer prototipo

Según avanza el proyecto, se crean versiones un poco más realistas de la red de Metro de Madrid. Con esta tercera versión se ha impulsado, sobre todo, el cambio de estructuras internas para el manejo de datos y la captación de nueva información que ha sido utilizada para el análisis estadístico que se verá posteriormente en este trabajo.

Para comenzar, se ha llevado a cabo una remodelación de una de las estructuras de datos principales del programa que es la que almacena los trenes. Después de observar y pensar mucho sobre las matrices que se estaban empleando, se ha concluido que no terminaban de ser eficientes y que contaban con limitaciones que ponían trabas al avance del proyecto. Es por esto por lo que se han sustituido por un único *data frame* que almacena todos los trenes que existen en el sistema, tanto si circulan por la línea 6 como por la 10. De esta forma, se puede acceder de manera sencilla a la línea, el tren y la estación y conocer el número de pasajeros.

Además, se ha dispuesto una nueva variable que especifica si un convoy se encuentra activo. Esta facultad es de utilidad en el caso del segundo recorrido (línea 10) ya que los trenes, al llegar a la última estación, se desactivan pero quedan almacenados con toda su información. En el segundo prototipo, cuando se daba esta situación, los trenes se reseteaban y se disponían de nuevo en la primera parada del trayecto, perdiendo los datos del vehículo. Así, cuando se hace el bucle *for*, si el tren al que se está accediendo no se encuentra activo se salta al siguiente.

Otra de las modificaciones importantes que se han realizado influye en la frecuencia con la que aparecen los trenes. Mientras que en versiones anteriores del código se establecía un número concreto de ellos que iban a circular por las vías que se sabía de antemano y que avanzaban en cada iteración, con esta tercera fase la aparición de estos convoyes se realiza de manera gradual cada vez que han pasado dos minutos del tiempo de la simulación.

En cuanto a la hora, se dejaba la tarea en el anterior apartado de retocar este aspecto. En esta versión, ya se han podido volcar de manera correcta en el *data frame* de la simulación y en archivo .csv los datos de la concreta en la que se encuentra el sistema en cada momento. Para ello se ha seguido usando la función `as.POSIXct("07:00:00", format = "%H: %M: %S", tz = "UTC")` que formatea las fechas y el tiempo de la simulación, pero en esta ocasión se emplea igualmente la función `as.difftime`, con la que se da formato de segundos. Las operaciones horarias se realizan todas en esta unidad de tiempo y posteriormente al final de cada iteración se transforma en diseño de horas, minutos y segundos.

A la información que ya se añadía al archivo con extensión .csv, se le han sumado dos nuevas contribuciones. Por un lado, con este tercer prototipo ahora se puede observar y analizar el número de pasajeros que transbordan de la línea 6 a la 10 y viceversa. Por otro lado, igualmente se lleva la cuenta del total de viajeros que llevan a cabo cambios de estaciones a lo largo de toda la simulación.

Capítulo 5. Definición y construcción del modelo de simulación

El resto de atributos han mantenido inalterados, siguiéndose la misma dinámica de bucles que en el apartado anterior, con ramas *if-else* similares y cálculos de del flujo de pasajeros que siguen realizándose igual.

5.4. Cuarto prototipo

El último prototipo que se ha realizado es el cuarto. En esta versión del sistema se han hecho una serie de cambios importantes, incluyendo considerables actualizaciones y formas de actuar del programa.

Con esta versión final se ha intentado acercarse un poco más a la red de Metro de Madrid que existe en la vida real. Si bien es cierto, sigue sin ser una simulación hiper realista y fiel debido a la inmensa complejidad de la que disponen las líneas 6 y 10. No obstante, nunca fue objeto de este trabajo llegar a obtener un sistema que fuese idéntico al real. Al fin y al cabo las simulaciones consisten en modelados simplificados de eventos concretos y el nivel de detalle depende de factores como la disponibilidad del tiempo y la propia intención subjetiva del sujeto que las lleva a cabo.

En primer lugar, tal y como ya ocurría en versiones anteriores, el paso el tiempo se calcula en segundos para luego transformarlo a formato “DD:MM:YY HH:MM”.

En segundo lugar, en lo que respecta a las estructuras utilizadas, se siguen manteniendo los ya conocidos *data frames*, uno que almacena los trenes que están activos con su ocupación y otro que dispone de todos los datos que luego se emplearán para realizar los análisis de la simulación. De esta manera, la segunda estructura queda compuesta por la línea, el tren, la ocupación que lleva, la estación en la que se encuentra, los pasajeros que suben en dicha parada, los que se bajan, el total de pasajeros que han pasado por la red de Metro hasta ese momento, el número de viajeros que hacen un transbordo desde la línea 6 hasta la 10 y viceversa, el total de personas que cambian de recorrido, el tipo de franja horaria del día y la hora.

A continuación, en tercer lugar, de entre todos los componentes que se han mencionado, existen tres nuevos. Por un lado, la ocupación se ha añadido para determinar y delimitar la cantidad de personas que pueden subir en cada tren. Como ya se había planteado en el Modelo Matemático descrito en el apartado 4, se ha dispuesto una constante figura como el valor máximo de personas que se pueden subir a un tren y que será igual para toda la comitiva que circule tanto por la línea 6 como por la línea 10. Para esta sección del código se ha creado una nueva función que a través de condicionales comprueba si en un determinado convoy existe espacio suficiente para que suban nuevas personas. Este método prioriza la subida de aquellos usuarios que ya se encontraban esperando en la estación porque no lograron montarse en un tren anterior debido a la alta ocupación frente a los pasajeros que llegan nuevos desde la calle o que transbordan desde otra línea.

Cabe destacar que una restricción olvidada hasta el momento y que resulta muy básica, pero realmente importante, es la de indicar durante la creación de pasa-

5.4. Cuarto prototipo

jeros que se bajan del tren que no pueden abandonar los convoyes un número superior al de personas que hay dentro de los mismos. Esta funcionalidad que no se había implementado hasta el prototipo final hacía que durante las pruebas saliesen ocupaciones negativas, lo que no tiene sentido físico.

Por otro lado, la segunda característica novedosa es la incorporación de franjas horarias. En el segmento 4 de este trabajo se disponían tres rangos horarios: "Punta", "Valle" y "Estándar". De acuerdo con esta descripción, se ha implementado un procedimiento que tomando de referencia la hora actual del día en la que se encuentra el sistema, determina si se trata de un tramo horario de máxima afluencia, ya sea de mañana, mediodía o tarde, de bajo movimiento o si existe una afluencia normal de viajeros.

Asimismo, la última función incorporada es la influencia de la ubicación en el tránsito de personas que entran y salen de red de metro. En la vida real es lógico que dependiendo de la zona en la que se encuentre una estación de metro, esta será visitada en mayor o menor medida según la cantidad de gente que viva a su alrededor y los puntos de interés que estén cerca. El sistema se ha implementado para que aquellas estaciones que estén situadas en la Zona B1, que están más alejadas del centro de la ciudad de Madrid, tengan menos flujo de usuarios que las de la Zona A, que están más próximas al epicentro de la actividad de la metrópolis.

En cuarto lugar, se debe mencionar la estructura del algoritmo principal. El código es muy similar al ya descrito en las versiones anteriores, ya que al tratarse de prototipos evolutivos, han ido mejorando sus características poco a poco pero manteniendo siempre una base estructurada semejante. Por lo tanto, se comienza, como ya se ha visto, por un bucle *while* que finaliza cuando se termina el tiempo de simulación establecido. En este caso, se establece el horario de funcionamiento real del metro que es desde las seis de la mañana a las dos de la madrugada. Dentro de este segmento se determina la franja horaria en la que se encuentra el sistema y se ajustan los valores de *lambda* y de frecuencia de trenes acorde a ella. Posteriormente, se comprueba si ha pasado el tiempo necesario para incluir nuevos trenes a la red.

Dentro del *while*, se encuentran los ya conocidos bucles *for*, el externo que recorre las dos líneas y el interno que itera sobre los trenes. Seguidamente, se ve la ubicación de la estación y se modifican las variables usadas para calcular el flujo de pasajeros con Poisson. Después se encuentran las ramas *if-else* que abren diferentes caminos en función de si la estación es la primera, la última o una parada intermedia y de si pertenece a la línea 6 o a la 10. El resto del cuerpo del código es similar al ya descrito en el tercer prototipo.

Tras pasar por la construcción de cuatro versiones progresivas, cada una más evolucionada que la anterior, se ha logrado terminar la simulación deseada para las líneas 6 y 10 de Metro de Madrid. Se ha alcanzado un sistema que modeliza una sencilla representación de una sección de la red del metro de la capital española con características singulares que la acercan en cierta medida a la versión de la vida real.

Capítulo 6

Análisis de Resultados

6.1. Primer prototipo

Tras la ejecución de la simulación del primer prototipo, se han podido obtener varios resultados en lo que respecta al foco principal que es el flujo de pasajeros por las estaciones y el movimiento de los trenes.

Por un lado, en cuanto al recorrido de los convoyes, se puede contemplar en la Figura 6.1 la matriz de trenes que representa el avance de los vehículos. La captura muestra el estado final en el que se encuentran los trenes al terminar la simulación tras el paso de los 10.080 minutos de duración que representa la ejecución del programa.

▼	V1	▲	V2	▲	V3	▲	V4	▲	V5	▲	V6	▲	V7	▲	V8	▲
1	0		0		1		0		0		0		0		0	
2	0		0		1		0		0		0		0		0	

Figura 6.1: Matriz que almacena el avance y la posición de los trenes por las diferentes estaciones. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, los trenes se encuentran detenidos en la estación tres, ambos en la misma parada. Esta situación es poco realista ya que dos trenes en la vida real no deberían coincidir al mismo tiempo y en el mismo lugar pues se podrían producir incidentes graves. Este es, sin duda, uno de los puntos claves a mejorar en las siguientes versiones del sistema.

Por otro lado, en lo que respecta al flujo de pasajeros, tal y como se ha comentado en este documento en el apartado 5.1, con los datos obtenidos en la simulación se ha creado un *data frame* en el que se especifica el tren, la estación en la que se encuentra el convoy en un ciclo específico, el número de pasajeros que suben y que bajan en dicha parada y el total de viajeros que han pasado por la línea hasta el momento.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.2 se muestra una captura con las primeras veinte líneas de información que devuelve la ejecución. Cabe destacar que la estructura cuenta con más de 60.000 filas por lo que no es factible presentar en este informe la salida al completo.

Tren	Estación	Nº de pasajeros que suben	Nº de pasajeros que bajan	Nº de pasajeros total
1	1	26	0	26
2	2	15	0	41
3	1	24	11	65
4	2	37	12	102
5	1	26	11	128
6	2	32	7	160
7	1	42	10	202
8	2	35	18	237
9	1	38	13	275
10	2	33	10	308
11	1	38	13	346
12	2	24	6	370
13	1	29	6	399
14	2	34	9	433
15	1	0	159	433
16	2	0	148	433
17	1	20	0	453
18	2	15	0	468
19	1	40	5	508
20	2	34	6	542

Figura 6.2: *Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.*

Empleando los datos descritos anteriormente se han realizado análisis y estadísticas que plasman en imágenes una visión generalista de las cifras que se manejan en el sistema.

En primer lugar, se han obtenido dos gráficos de barras que exponen la cantidad de pasajeros que suben y bajan por estación y por tren, a lo largo del recorrido de la línea con sus ocho estaciones.

El primer caso se ve representado en la Figura 6.3. En esta ilustración se puede apreciar cómo el número medio de usuarios que se ha ido generando en la simulación para cada estación, ha sido similar para todas las paradas y para ambos trenes, en torno a los 35, menos para la primera y para la última, que cuentan con unas cifras de aproximadamente 10 y 0, respectivamente. En el caso de la última parada, se releva claramente el diseño establecido en la sección 5.1 por el cual se establece que como no existirán más estaciones después de la octava y el tren se resetea, no se deben aceptar pasajeros.

6.1. Primer prototipo

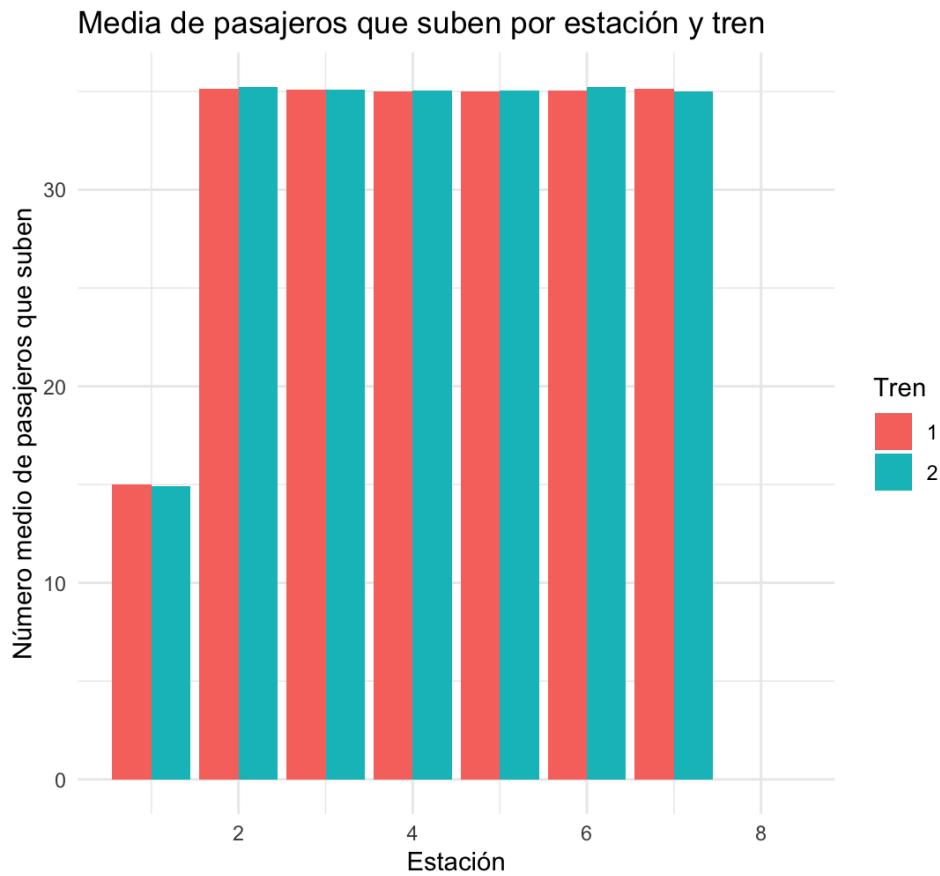


Figura 6.3: *Cantidad media de pasajeros que suben en cada tren por estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana).* Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la Figura 6.4, la gráfica muestra la cifra media de usuarios de cada tren que se bajan en cada estación de la línea. En la primera parada, como es evidente, no se baja ninguna persona ya que el tren comienza su recorrido y por lo tanto se encuentra vacío. Las estaciones intermedias muestran una media aproximada similar de en torno a 10, una cantidad relativamente baja.

En contraposición, en la última estación, el número de viajeros que baja es considerablemente alto llegando a rozar un valor medio de 165. Esta cifra se explica debido a la inexistencia de una siguiente parada, lo que hace que todos aquellos clientes que se han ido acumulando a lo largo de la línea y que no se han quedado en puntos anteriores tengan que salir del tren en la octava y última detención del vehículo.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

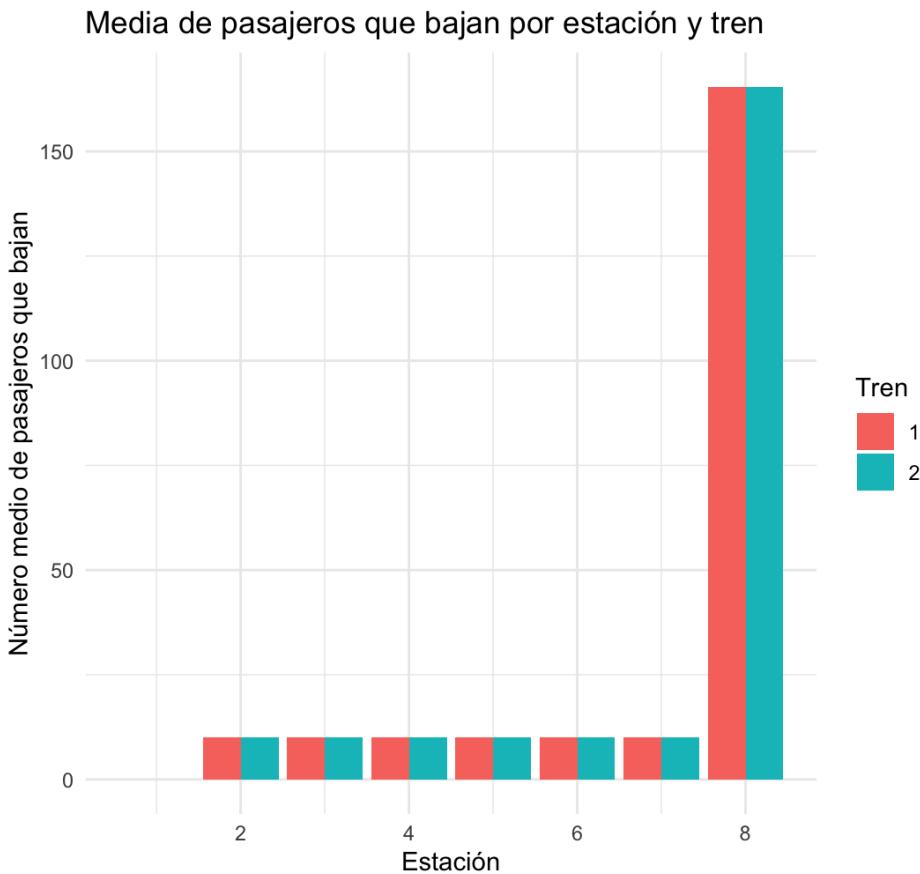


Figura 6.4: *Cantidad media de pasajeros que bajan de cada tren por estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana).* Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, también se ha podido estudiar la variabilidad existente en la cantidad de pasajeros que suben y bajan de los trenes por cada parada existente en la línea.

Si se observa detenidamente la Figura 6.5 se puede ver que, tal y como se mencionaba anteriormente, hay una clara diferenciación entre las paradas 1, 8 y el resto de ellas. En las estaciones dos a la siete, la mediana se encuentra en los 35 con un cuartil superior que se sitúa en torno a los 32 y un cuartil inferior que se localiza en los 39. Además, existen bastantes casos de valores atípicos, tanto por encima como por debajo de los extremos superiores e inferiores, que tienen valores cercanos a los cincuenta y veinte, respectivamente. En cuanto a la primera estación, la mediana se localiza en los 15 puntos, el cuartil superior de más o menos 17 y un cuartil inferior de doce. Asimismo, los extremos se localizan en 25 el superior y en cinco el inferior, contando con valores atípicos, al igual que el resto de las paradas. La última estación aparece representada con una sola línea negra que presenta la mediana de los valores que es cero, ya que en todos los ciclos la cantidad de pasajeros que se suben en el octavo punto de la línea es cero.

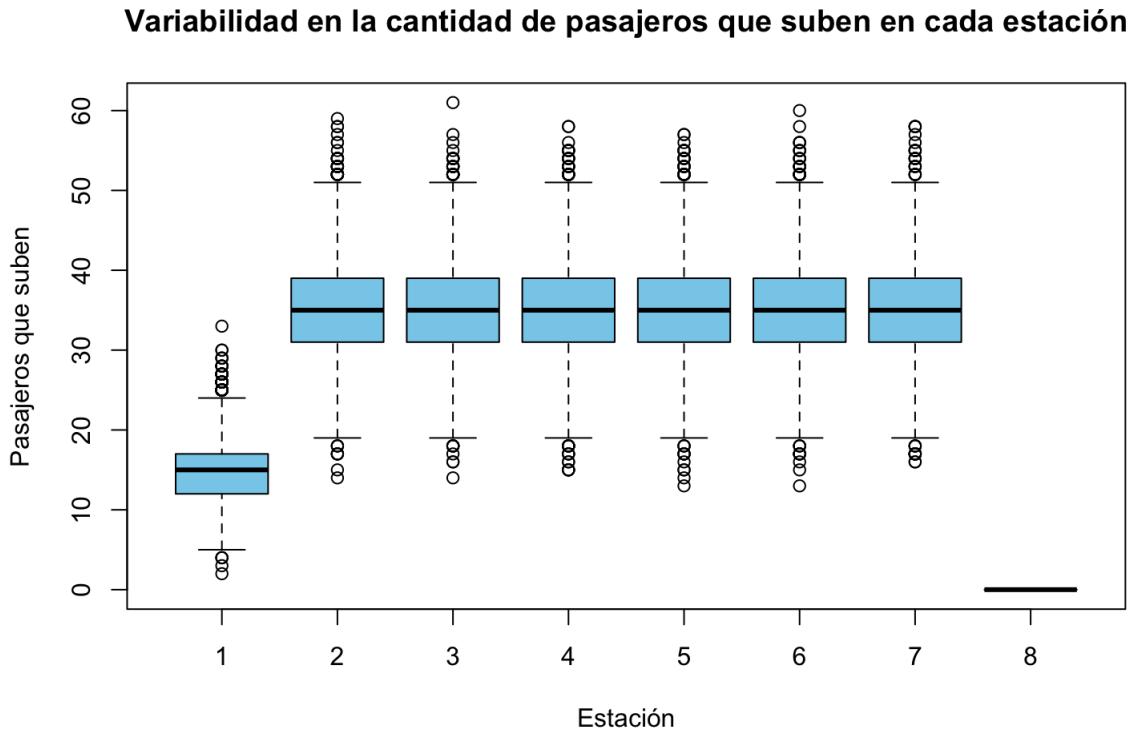


Figura 6.5: *Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben a los trenes en cada estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana).*
Fuente: Elaboración propia.

Por último, en lo que respecta a la variabilidad en la cantidad de viajeros que bajan de los trenes por cada estación, en las estaciones dos a la siete, la mediana se encuentra en los diez, con unos cuartiles tanto inferior como superior muy cercanos a dicha cifra. Existe algún caso de valores atípicos, si bien no son demasiado relevantes. La primera estación aparece dibujada con una sola línea negra que representa la mediana de los valores que es cero, ya que en todos los ciclos la cantidad de pasajeros que se bajan en el primer punto de la línea es cero, pues el tren va vacío.

La última estación es la que cuenta con unos números más interesantes, tal y como se vislumbraba previamente en este trabajo. La mediana se sitúa en los 165 pasajeros, aproximadamente, y los cuartiles superior e inferior en torno a los 75 y 55 viajeros, respectivamente. En cuanto a los extremos, el superior supera los 200 y el inferior roza los 115 usuarios. Esta descripción puede verse reflejada en la Figura 6.6 que aparece a continuación.

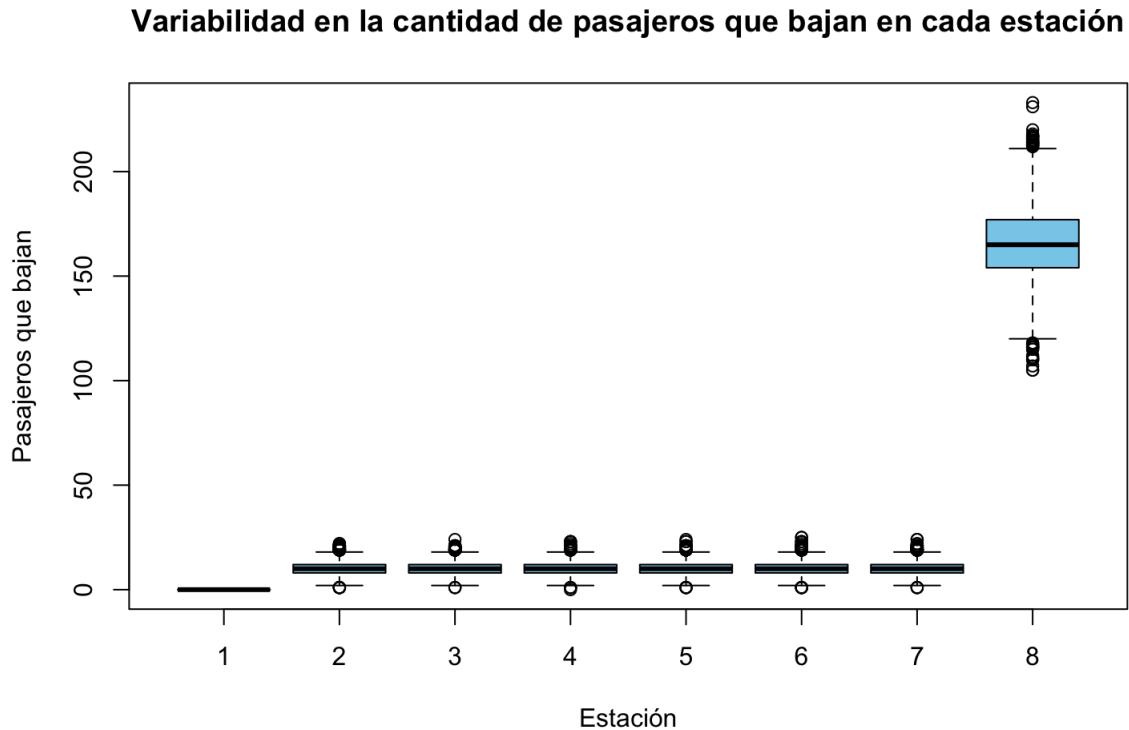


Figura 6.6: *Variabilidad en la cantidad de pasajeros que bajan de los trenes en cada estación a lo largo del tiempo de simulación (10.080 minutos o una semana).*
Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que existen algunos valores atípicos tanto por encima como por debajo, si bien, no destacan tanto como en el caso de la gráfica de variabilidad de pasajeros que suben, en la Figura 6.5.

6.2. Segundo prototipo

Con este segundo prototipo se ha llevado a cabo un experimento en el que la duración de la simulación ha sido de 1.440 minutos, es decir, un día. El tiempo por ciclo era de 0.33 minutos, unos 20 segundos.

Como ya se ha mencionado en el apartado 5.2 de este trabajo, esta versión ya cuenta con todas las estaciones y líneas que se deseaban plasmar desde un principio. Debido a esto, las matrices que se utilizan para mostrar el avance de los trenes por las distintas estaciones de la línea 6 y la línea 10 ya cuentan con 28 y 31 columnas, respectivamente. Para simplificar las gráficas, a partir de este prototipo y para los restantes, las estaciones serán referidas con números. La asociación de cada parada con su número se puede encontrar en el Apéndice B de este documento.

A modo de ejemplo, en la Figura 6.7 se muestra la estructura, en este caso de la

6.2. Segundo prototipo

matriz correspondiente a la línea 6, con los datos que se han obtenido al finalizar el tiempo de simulación. Para simplificar y aportar claridad, no se ha incluido la tabla de la línea 10 ya que es similar a la anterior pero con un total de 31 columnas.

Además, como se puede observar, los trenes se encuentran ambos parados en la estación 25, es decir, Príncipe Pío, lo que en la vida real no podría pasar. Esto se solucionará en futuras versiones del sistema.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
...								
V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0

Figura 6.7: Matriz que almacena el avance y la posición de los trenes por las diferentes estaciones. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los transbordos, el *data frame* que se ha empleado es el que se muestra en la Figura 6.8, almacenándose todos los posibles cambios desde la L6 a la L10 y viceversa. A pesar de disponerse de la estructura, los cambios de línea no se han incluido en los análisis y gráficos.

	Linea_origen	Estacion_origen	Linea_destino	Estacion_destino
1		6	18	10
2		10	14	6
3		6	25	10
4		10	9	6
				25

Figura 6.8: Matriz que almacena los posibles transbordos. Fuente: Elaboración propia

En lo que respecta al *data frame* que contiene toda la información del experimento que posteriormente será analizada, alberga siete columnas con la línea, el identificador del tren, la estación, el número de pasajeros que suben, los viajeros que bajan, el total de usuarios que han utilizado el servicio de metro y la hora, si bien se recuerda que esta última no dispone del formato adecuado en este prototipo y, por lo tanto, no será empleada para el estudio. En cuanto a las

Capítulo 6. Análisis de Resultados

filas, la estructura está compuesta por miles de ellas, una por cada uno de los trenes y por cada ciclo de simulación.

A continuación se disponen algunos de los resultados obtenidos:

Línea	Tren	Estación	Nº de pasajeros que suben	Nº de pasajeros que bajan	Nº de pasajeros total	Hora
1	1	1	17	0	17	1716793200
2	1	2	15	0	32	1716793200
3	2	1	16	0	48	1716793200
4	2	2	18	0	66	1716793200
5	1	1	15	10	81	1716793200
6	1	2	19	10	100	1716793200
7	2	1	9	6	109	1716793200
8	2	2	14	7	123	1716793200
9	1	1	16	15	139	1716793200
10	1	2	24	10	163	1716793200
11	2	1	13	14	176	1716793200
12	2	2	12	7	188	1716793200
13	1	1	16	10	204	1716793201
14	1	2	16	6	220	1716793201
15	2	1	15	13	235	1716793201
16	2	2	13	9	248	1716793201
17	1	1	23	6	271	1716793202
18	1	2	15	7	286	1716793202
19	2	1	11	8	297	1716793202
20	2	2	14	12	311	1716793202

Figura 6.9: *Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.*

Con todos los bloques de datos expuestos y una vez llevada a cabo la ejecución de la simulación, se han realizado análisis y estadísticas que presentan las cifras que se han manejado en el experimento.

En primer lugar, en las Figuras 6.10 y 6.11 se disponen dos gráficas que exponen el número medio de usuarios que se ha ido generando en la simulación para cada estación, para cada una de las líneas y para cada uno de los trenes. Como se puede observar, el patrón de la variable por estaciones es muy plano, es decir, el flujo de pasajeros ha sido similar para en todos los casos, en torno a los quince, ya que los eventos se generan con el mismo parámetro de Poisson.

Existe una excepción a este comportamiento que ya se había podido avistar con el análisis de los resultados obtenidos con el primer prototipo. Es el caso de la última terminal de la línea 10 en la que, al tratarse del final del recorrido, no se acepta la subida de nuevos viajeros.

Cabe destacar que este circunstancia no se ve reflejada en la imagen referente a la L6. Esto tiene su explicación en el hecho de que el efecto que sucede en la última estación de la L10 no se produce en su homóloga del otro recorrido. La línea 6 cuenta con una trayectoria circular, debido a esto, no existe realmente una parada inicial o final y, por lo tanto, no se impone la restricción de subida a los usuarios, como sí ocurría en la 10.

6.2. Segundo prototipo

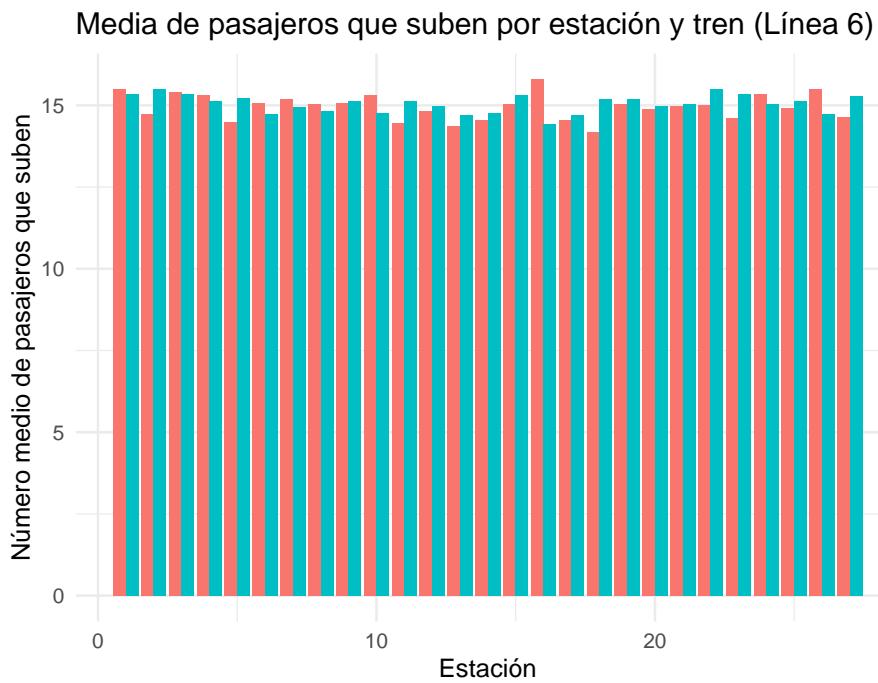


Figura 6.10: Cantidad media de pasajeros que suben en cada tren por estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo).
Fuente: Elaboración propia.

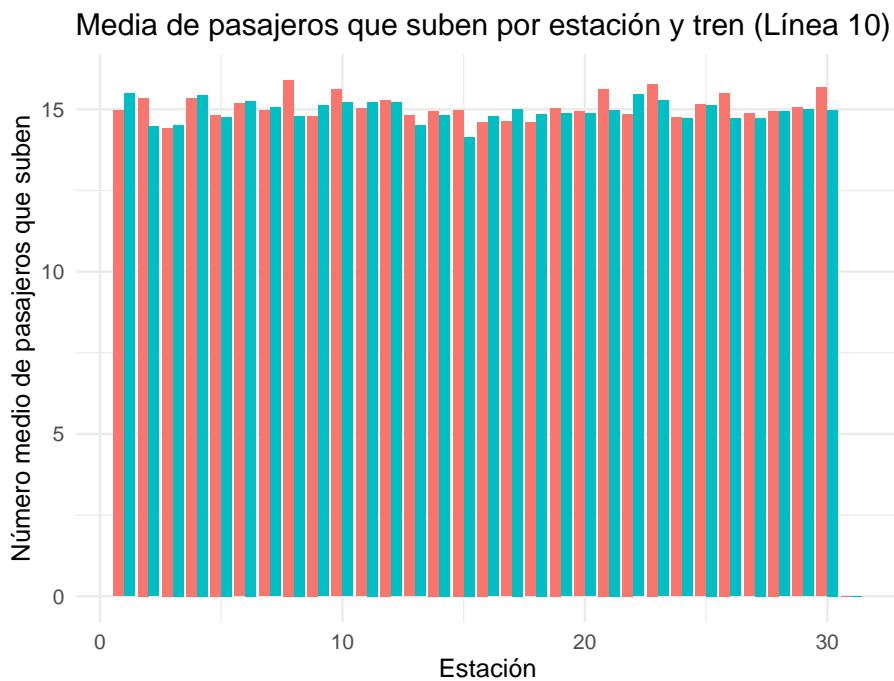


Figura 6.11: Cantidad media de pasajeros que suben en cada tren por estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo).
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

En segundo lugar, en cuanto a la media de pasajeros que bajan de cada tren en cada estación y por cada línea, se ha representado, al igual que con las subidas, en dos gráficos de barras en las Figuras 6.12 y 6.13.

En este caso del experimento se ha llegado a resultados muy distintos entre ambos diagramas. Si se presta atención la ilustración referente a la línea 6, se puede comprobar cómo existe un patrón similar al que se veía con las entradas al interior de los convoyes, salvo que en este momento los valores rondan en torno al diez, que es la cifra que se asignó para la variable *lambda* de salidas de los trenes. Este efecto tiene sentido ya que, como se mencionaba anteriormente, la L6 es circular y, por lo tanto, no hay ningún factor que modifique el normal comportamiento del sistema.

Por el contrario, en la línea 10 existe la imposición que prohíbe a las personas montarse en los trenes si estos se encuentran en la estación final del recorrido. Esta limitación afecta al funcionamiento de todo el sistema cuando se recorre con el bucle *for* el conjunto de los trenes existentes en la L10. De esta manera, durante las primeras paradas la media de bajadas es muy inferior a la cifra de salidas que se da en la última terminal de esta ruta. Ocurre algo semejante para la primera estación, Hospital Infanta Sofía, no obstante, los valores son opuestos, es decir, la media es cero. Esto es debido a que al tratarse del inicio de la ruta, no podía haberse subido nadie anteriormente y, por lo tanto, los trenes están vacíos.

Media de pasajeros que bajan por estación y tren (Línea 6)

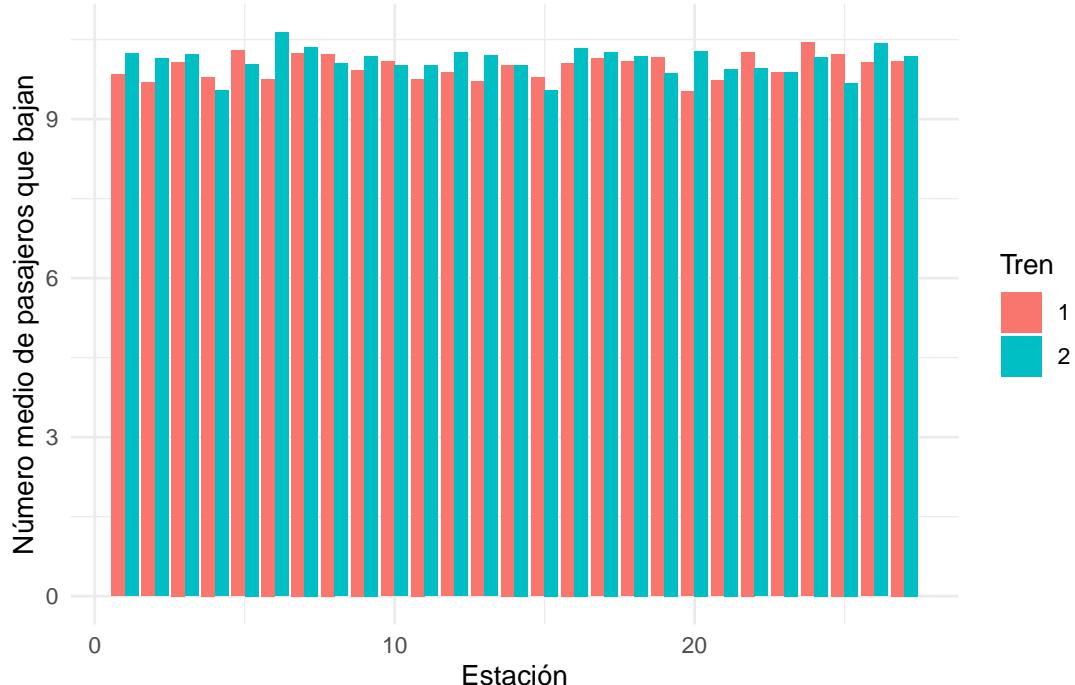


Figura 6.12: Cantidad media de pasajeros que bajan de cada tren por estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.

6.2. Segundo prototipo

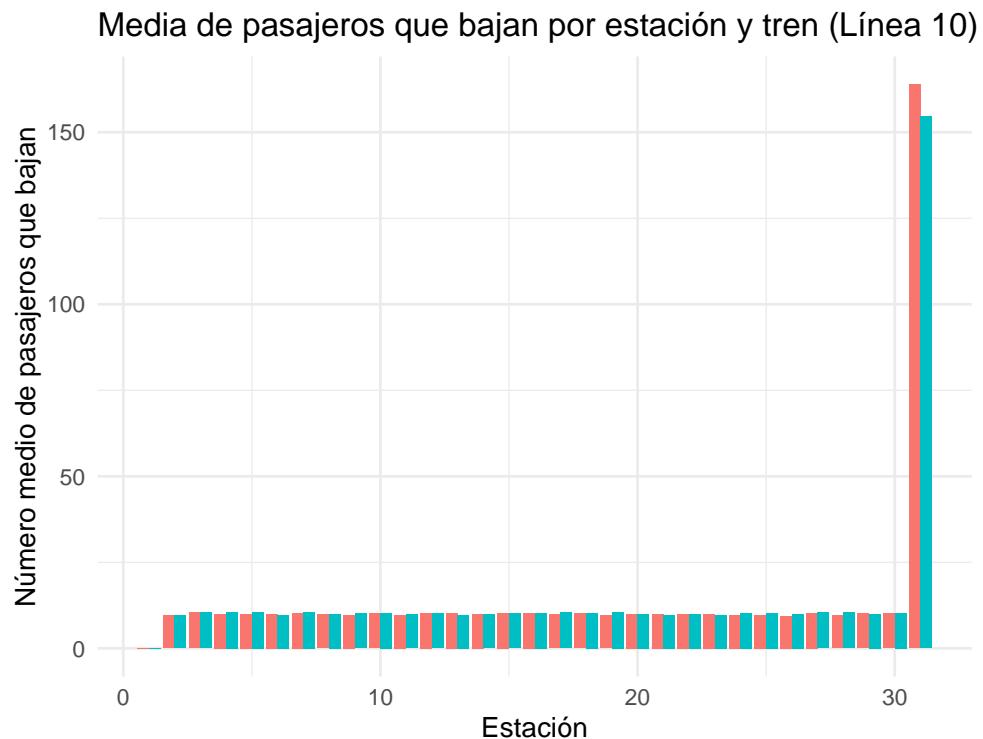


Figura 6.13: *Cantidad media de pasajeros que bajan de cada tren por estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo).*
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en tercer lugar, también se ha podido estudiar la variabilidad existente en la cantidad de pasajeros que suben y bajan de los trenes por cada parada existente. Para ello se han creado cuatro diagramas distintos que diferencian, dos a dos, entre las líneas que forman parte del experimento de simulación.

Por un lado, si se observan detenidamente las Figuras 6.14 y 6.15, se puede ver un efecto aparentemente muy parecido al que se ha podido ver con los anteriores estudios de la media de usuarios que llegan al metro en un punto determinado y se montan en los convoyes, y del promedio personas que bajan de los vehículos y abandonan la red de transporte. En este caso, todas las terminales tanto de la línea 6 como de la 10, a excepción de la estación 31 de esta última que corresponde con Puerta del Sur, presentan medianas con valores cercanos a quince. El cuartil superior o Q1 se sitúa alrededor de los 18 y el inferior o Q3 sobre el 13. Además, existe una serie de casos de valores atípicos, tanto por encima como por debajo de los extremos superiores e inferiores, que tienen valores cercanos a los 25 y 5, respectivamente.

En cuanto al final del camino de la L10, la parada aparece representada con una sola línea negra que presenta la mediana de los valores que es cero, ya que en todos los ciclos la cantidad de pasajeros que se suben en ese punto es cero.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben en cada estación de la línea 6

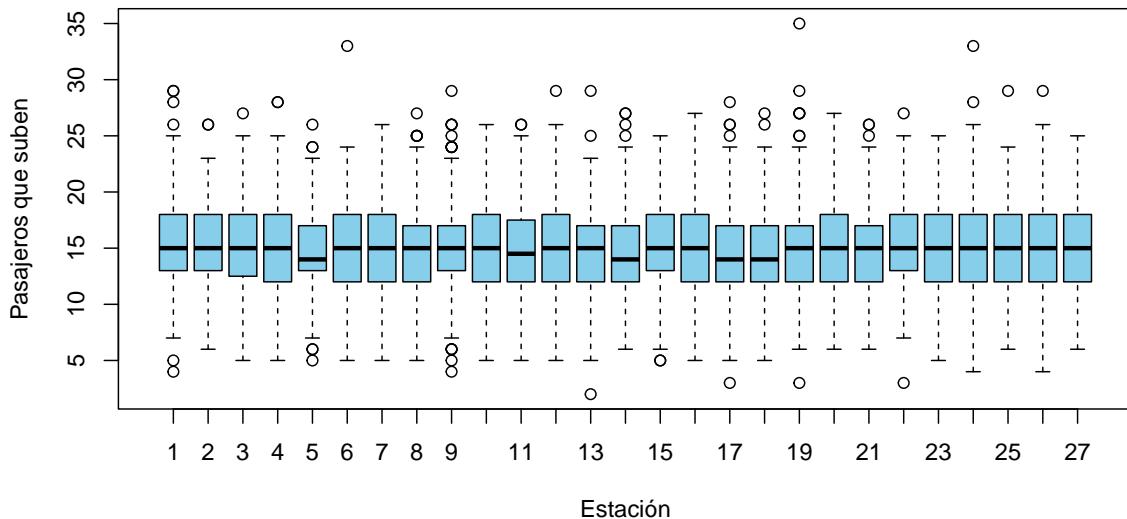


Figura 6.14: *Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben a los trenes en cada estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo).* Fuente: Elaboración propia.

Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben en cada estación de la línea 10

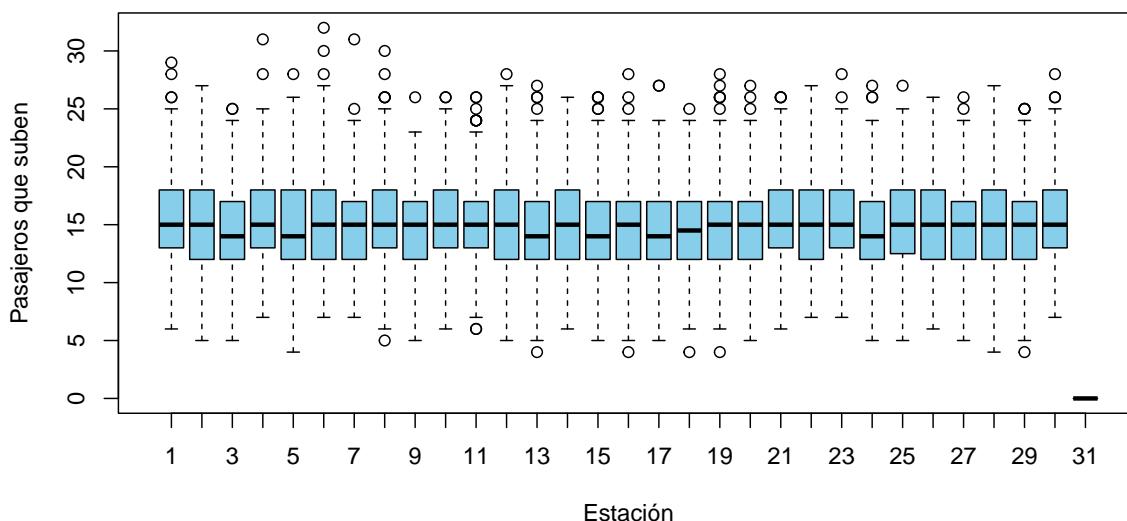


Figura 6.15: *Variabilidad en la cantidad de pasajeros que suben a los trenes en cada estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo).* Fuente: Elaboración propia.

6.2. Segundo prototipo

Por último, en lo que respecta a la variabilidad en la cantidad de viajeros que se bajan de los trenes por cada estación y por línea, se produce el efecto esperado. Por un lado, en las paradas de la línea 6 los datos son más constantes, la mediana se encuentra en los diez, con unos cuartiles tanto inferior como superior muy cercanos a dicha cifra, acercándose aproximadamente a los trece y a los ocho. Además, existen ciertos casos de valores atípicos, tal y como ocurría con la medida de la variabilidad de las subidas. Esta información se puede ver detallada de una forma más visual en la Figura 6.16.

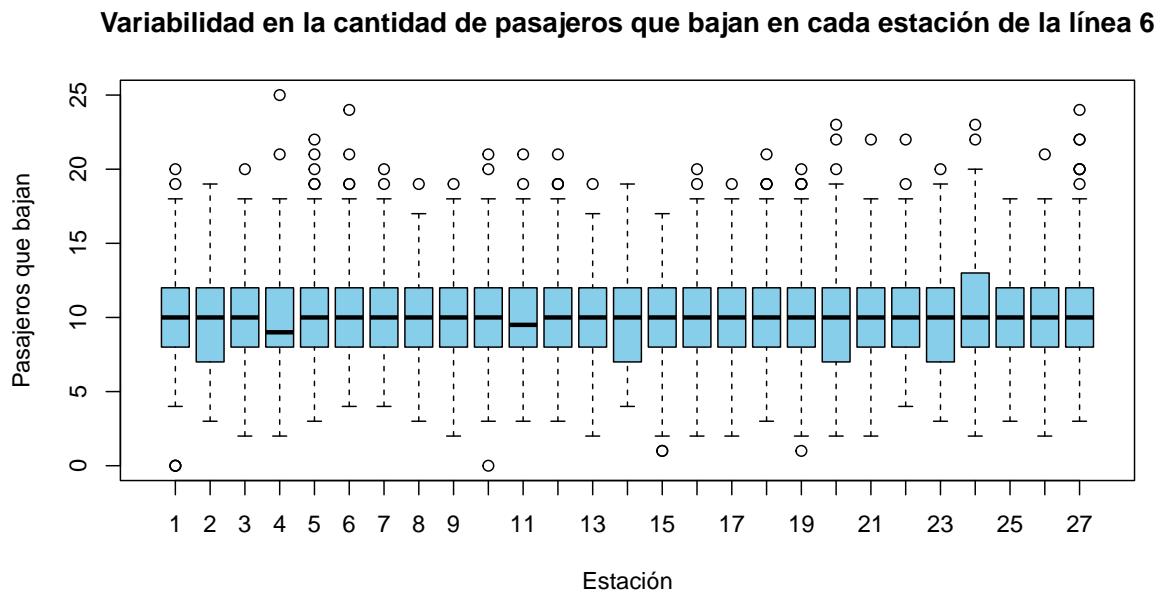


Figura 6.16: *Variabilidad en la cantidad de pasajeros que bajan de los trenes en cada estación de la línea 6 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo).* Fuente: Elaboración propia.

Ocurre todo lo contrario si se pone el foco en la Figura 6.17. La primera estación aparece dibujada con una sola línea negra que representa la mediana de los valores que es cero, ya que en todos los ciclos la cantidad de pasajeros que se bajan en el primer punto de la línea es cero, pues el tren va vacío. La última estación es la que cuenta con unos números más curiosos, tal y como se vislumbraba previamente en este trabajo. La mediana se sitúa en los 165 pasajeros, aproximadamente, y los cuartiles superior e inferior en torno a los 175 y los 145 viajeros, respectivamente. En cuanto a los extremos, el superior supera los 200 y el inferior roza los 90 usuarios. Cabe destacar que no existen valores atípicos para esta parada.

El resto de estaciones intermedias se mantienen en valores bajos, cercanos al diez y se pueden encontrar algunos valores atípicos por encima, si bien, no destacan tanto como en el caso de la gráfica de variabilidad de pasajeros que suben.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

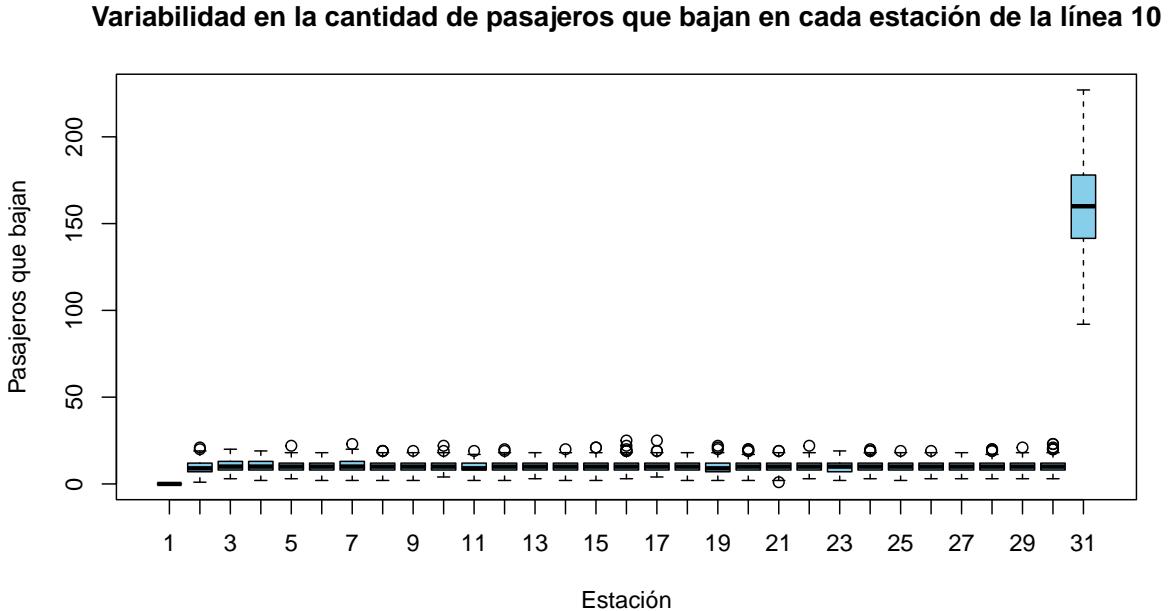


Figura 6.17: Variabilidad en la cantidad de pasajeros que bajan de los trenes en cada estación de la línea 10 a lo largo del tiempo de simulación (1.440 minutos o un día completo). Fuente: Elaboración propia.

6.3. Tercer prototipo

Con el tercer prototipo la duración de la simulación que se ha realizado ha sido de 1.200 minutos, es decir, una jornada de unas 20 horas, con ciclos de un minuto y medio. Esta duración se ha escogido teniendo en mente la cuarta y última versión que se va a realizar y que se desea que analice los datos que se obtengan del funcionamiento de la red durante un período de apertura del servicio normal.

Como ya se ha mencionado en el apartado 5.3 de este documento, en este punto las matrices que se utilizaban anteriormente para mostrar el avance de los trenes por las diferentes estaciones de la línea 6 y la línea 10 han sido sustituidos por un único *data frame* que almacena todos los trenes de la red. En la Figura 6.25 situada a continuación, se muestra una captura de dicha estructura.

Además, como se puede observar, los primeros convoyes se encuentran inactivos, ya que han llegado al final del recorrido, mientras que los últimos seguían activos en el momento de la finalización de la simulación.

6.3. Tercer prototipo

	Activo	Línea	Tren	Estación	N_pasajeros
1	FALSE		1	1	28
2	FALSE		2	2	31
3	FALSE		1	3	28
4	FALSE		2	4	31
5	FALSE		1	5	28
6	FALSE		2	6	31
7	FALSE		1	7	28
8	FALSE		2	8	31
9	FALSE		1	9	28
10	FALSE		2	10	31
190					
...					
795	TRUE		1	795	7
796	TRUE		2	796	7
797	TRUE		1	797	5
798	TRUE		2	798	5
799	TRUE		1	799	3
800	TRUE		2	800	3
3764					

Figura 6.18: *Data frame que almacena los trenes existentes en la red de metro.*
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al *data frame* que alberga toda la información del experimento que es analizada, cuenta con un total de diez columnas. Estos campos son la línea, el tren, la estación, el número de pasajeros que suben, los viajeros que bajan, el total de usuarios que han utilizado el servicio de metro, el número acumulado de personas que han hecho un transbordo desde la línea 6 a la 10, el valor acumulado de cambios desde la línea 10 a la 6, el total de transbordos y la hora. Esta última ya cuenta con el formato adecuado en este prototipo. A continuación, en la Figura 6.26 se dispone de una pequeña muestra de los resultados obtenidos:

	Línea	Tren	Estación	Nº de pasajeros que suben	Nº de pasajeros que bajan	Nº de pasajeros total
1	1	1	1	11	0	11
2	2	2	1	17	0	28
3	1	1	2	11	7	39
4	2	2	2	17	14	56
5	1	1	3	15	7	71
6	1	3	1	13	0	84
7	2	2	3	13	11	97
8	2	4	1	24	0	121
9	1	1	4	14	5	135
10	1	3	2	19	18	154

Capítulo 6. Análisis de Resultados

...

Nº transbordos L6 a L10	Nº transbordos L10 a L6	Nº transbordos totales	Hora
0	0	0	07:00:00
0	0	0	07:00:00
0	0	0	07:01:30
0	0	0	07:01:30
0	0	0	07:03:00
0	0	0	07:03:00
0	0	0	07:03:00
0	0	0	07:03:00
0	0	0	07:04:30
0	0	0	07:04:30

Figura 6.19: Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.

Para comenzar el análisis, se ha estudiado el flujo de pasajeros que han subido a los trenes de la línea 6 y 10 a lo largo de un período de tiempo desde las 07:00 de la mañana y durante un total de veinte horas, hasta las 03:00 de la madrugada del día siguiente. La visualización de dicho trabajo se presenta de manera gráfica en las Figuras 6.20 y 6.21.

Es necesario mencionar que en todos los gráficos se ha decidido que el origen de coordenadas sea las doce de la noche, es decir, el valor 00:00. Esta elección se ha basado en el pensamiento de poder ofrecer una visión clara de lo que sucede en el momento de la finalización de la simulación.

Por un lado, en lo que respecta al recorrido circular, los resultados muestran datos coherentes con lo esperado. Existe una clara tendencia con valores en torno al quince, tal y como se ha estado observando en prototipos anteriores, que corresponde con el valor de *lambda* que se le pasa a la función que calcula la distribución de Poisson para las subidas. Al ser un trayecto “infinito”, los accesos a los trenes son siempre constantes con valores que, en ciertas ocasiones, sobresalen por tratarse de números aleatorios. Además, hay una clara ausencia de valores en una franja intermedia que se da al terminar el experimento. Con este división se puede apreciar una clara similitud entre valores finales e iniciales.

Para una mejor comprensión, en la Figura 6.20 se dispone un representación gráfica de la descripción dada en el párrafo anterior.

6.3. Tercer prototipo

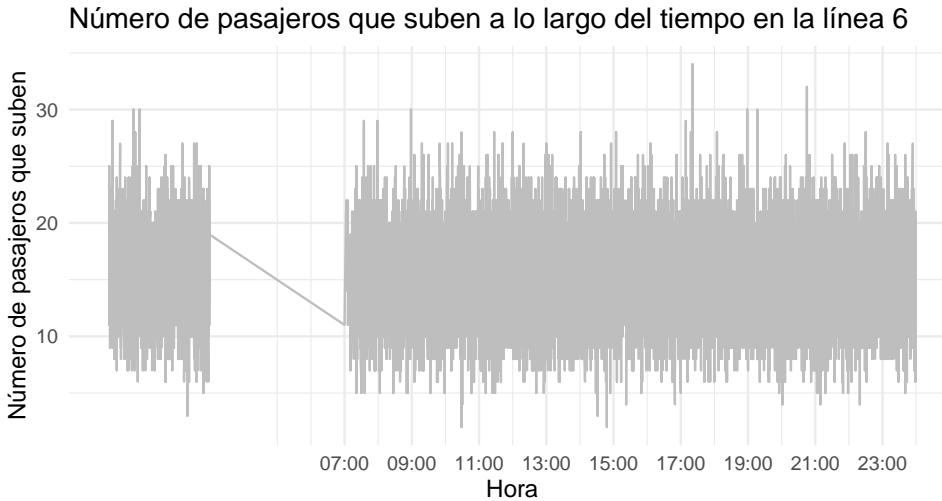


Figura 6.20: *Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, la línea 10 nos confirma experiencias vividas en antiguas versiones. Si se centra bien la atención, se puede apreciar cómo, a diferencia de lo que ocurría en la Figura 6.20, en este caso el color predeterminado azul, que coincide con el que representa a la línea de metro en la vida real, cubre todo el espacio inferior. Esto se explica debido a que al llegar a las paradas finales, la cifra de viajeros que se montan en un convoy es cero por las restricciones impuestas ya vistas. No obstante, dichos casos se alcanzan solo a partir de las 07:45 que es cuando el primer tren finaliza el recorrido, se desactiva y por lo tanto ningún usuario puede acceder al vehículo. Esta evento se refleja con un espacio en blanco que corta repentinamente con el azul en el rango dispuesto en el gráfico entre las 07:00 y las 09:00.

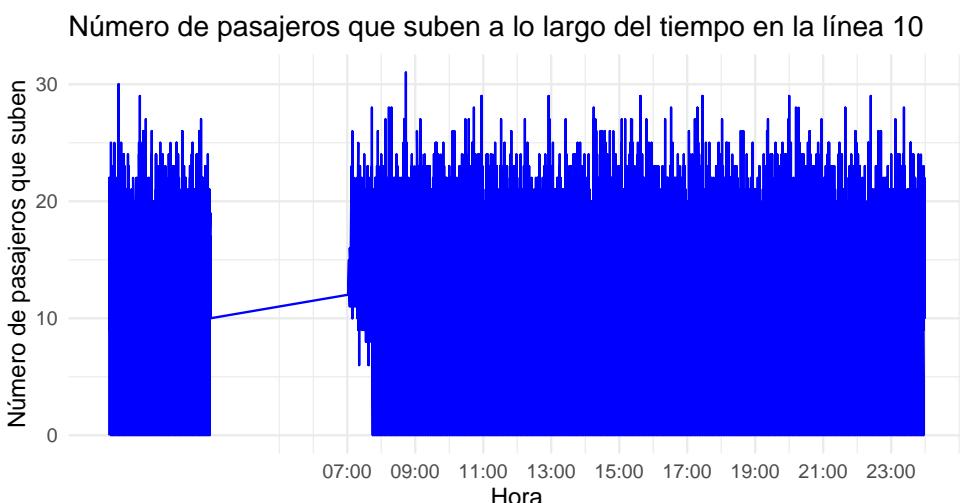


Figura 6.21: *Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.*

Capítulo 6. Análisis de Resultados

A continuación, se ha analizado el flujo de pasajeros que han bajado de los distintos trenes de la línea 6 y 10 a lo largo de un período de tiempo desde las 07:00 de la mañana y durante un total de veinte horas, hasta las 03:00 de la madrugada del día siguiente. La representación gráfica de dicho estudio se dispone en las Figuras 6.22 y 6.23.

Por un lado, en cuanto a la L6, la información lograda resulta acorde a lo esperado. Se aprecia una clara línea de tendencia con valores en torno al diez, tal y como se ha estado observando en versiones anteriores del sistema, que corresponde con el valor de *lambda* que se le pasa a la función que calcula la distribución de Poisson para las bajadas. En este caso, con el inicio del experimento a las 07:00 de la mañana sí que existen valores nulos o cero, al no poder bajarse ningún pasajero, pues los trenes comienzan vacíos.

Sin embargo, el resto de la franja inferior está en blanco pues siempre existen viajeros para todas las estaciones que se bajan de los convoyes. En adición, los descensos de los trenes son más o menos constantes con cifras que en determinados momentos sobresalen del resto por tratarse de números aleatorios.



Figura 6.22: Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el gráfico de la L10 en la Figura 6.23, resulta un tanto extraño. Tal y como se puede apreciar, existe una escalada progresiva desde el inicio del experimento hasta su finalización, alcanzando valores, en ciertas ocasiones, demasiado grandes. Y aunque a primera vista parece no tener una explicación razonable, lo cierto es que el causante de las desviaciones es un sencillo factor que no se ha tenido en consideración hasta el momento y es la limitación de bajada de pasajeros, cuyo valor debe ser siempre inferior al de usuarios que haya dentro del tren. Este error se subsana con la última versión del proyecto.

A pesar de todo, si hay algo que se puede apreciar de esta imagen es la inexis-

6.3. Tercer prototipo

tencia de viajeros que bajan a primera hora debido al inicio del servicio con los vehículos vacíos.

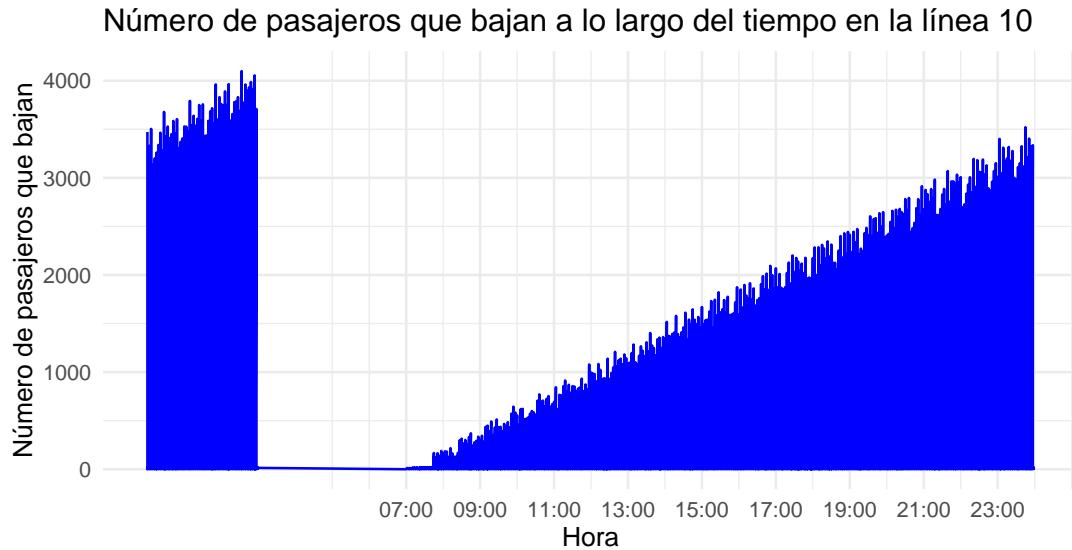


Figura 6.23: *Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente se llega al apartado de los transbordos. A pesar de haberse incorporado con el segundo prototipo, se ha decidido esperar hasta la siguiente generación de código para llevar a cabo un estudio de los mismos, para asegurar su buen funcionamiento.

Los cambios de línea suponen un pilar fundamental en el flujo de pasajeros, que presentan la necesidad de modificar su recorrido, ampliando los lugares a los que se puede viajar sin tener que salir de la red de metro.

En la Figura 6.24 se plasma la evolución del número de pasajeros que, a lo largo del día realizan transbordos. En gris aparece representado el volumen acumulado de viajeros que han llevado a cabo un cambio desde la línea circular a la 10 y en azul el movimiento contrario, es decir, desde la L10 hasta la línea 6. Se puede apreciar un efecto curioso y es que el relleno de ambos casos es prácticamente idéntico, con unas cifras un tanto superiores para el segundo caso. Este resultado concuerda, en realidad, con lo esperado desde un principio.

Al tratarse de un circuito cerrado cuyo flujo de pasajeros no se ve modificado por variables externas, la cifra de viajeros que bajan de los trenes en las estaciones que cuentan con posibilidad de transbordo es siempre muy similar. De este rango de números, se escoge un valor al azar que corresponderá con el total de personas que cambien de recorrido y siendo el resto la cantidad de usuarios que abandonan el metro. Estos valores aleatorios que se toman, en cierto modo, dejan de ser tan aleatorios debido a la falta de elección, produciéndose el efecto que se muestra en la Figura 6.24.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

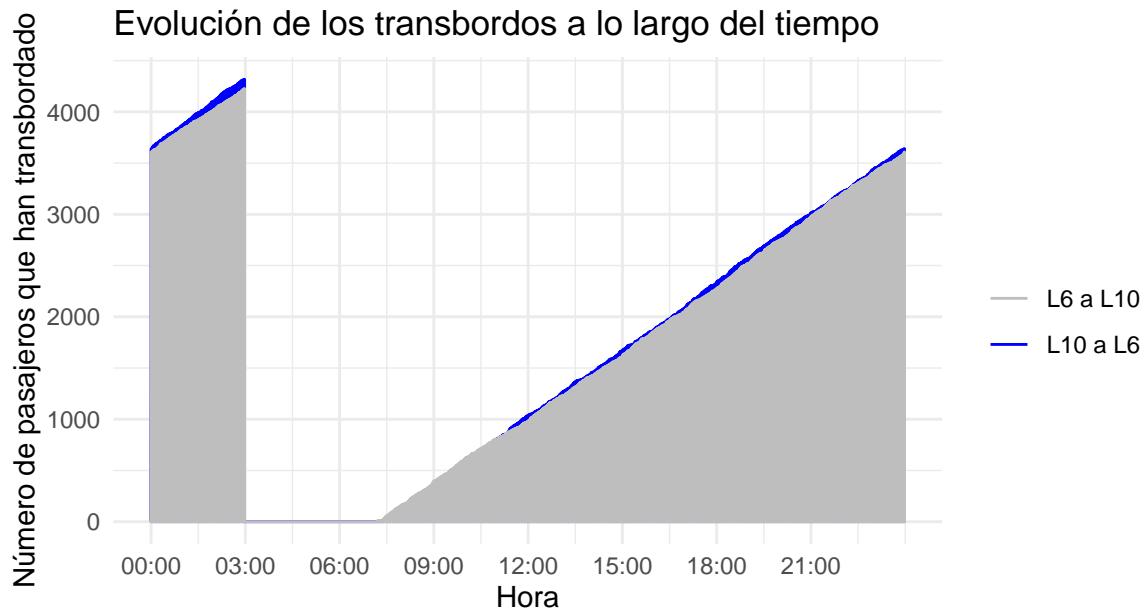


Figura 6.24: *Evolución del número de pasajeros que hacen transbordos en la red de metro. Fuente: Elaboración propia.*

6.4. Cuarto prototipo

El cuarto y último prototipo de la simulación de las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid es la versión más realista que se ha implementado, incorporando diferentes factores que influyen directamente al flujo de pasajeros, tal y como se explicó en el apartado 5.4.

La duración de la simulación ha sido de 1.200 minutos, es decir, una jornada de unas 20 horas, con ciclos de un minuto y medio, la misma cantidad de tiempo que en el tercer prototipo, es decir, se han empleado réplicas idénticas e independientes del mismo experimento. Como ya se ha mencionado, la razón que explica esta decisión es el deseo de experimentar y ver lo que sucede a lo largo de una jornada de apertura de la red de metro. La hora establecida para el inicio son las 06:00 de la mañana y, por lo tanto, la finalización es a las 02:00 de la madrugada del día siguiente.

Además, es necesario mencionar que se han modificado los valores de *lambda* para las subidas y las bajadas siendo de 22 y 20, respectivamente.

El textitdata frame que almacena todos los trenes de la red se sigue manteniendo. En la Figura 6.25 que se sitúa a continuación, se muestra un ejemplo de las salidas de dicha estructura.

Además, como se puede observar, los primeros convoyes se encuentran inactivos, ya que han llegado al final del recorrido, mientras que los últimos seguían activos en el momento de la finalización de la simulación.

6.4. Cuarto prototipo

	Activo	Línea	Tren	Ocupacion	Estacion	N_pasajeros
1	FALSE	1	1	80	28	0
2	FALSE	2	2	59	31	0
3	FALSE	1	3	69	28	0
4	FALSE	2	4	89	31	0
5	FALSE	1	5	79	28	0
6	FALSE	2	6	55	31	0
7	FALSE	1	7	92	28	0
8	FALSE	2	8	89	31	0
9	FALSE	1	9	91	28	0
10	FALSE	2	10	119	31	0
...						
794	TRUE	2	794	56	31	0
795	TRUE	1	795	207	21	0
796	TRUE	2	796	25	21	0
797	TRUE	1	797	295	11	0
798	TRUE	2	798	21	11	0

Figura 6.25: Data frame que almacena los trenes existentes en la red de metro.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la estructura que guarda todos los datos del experimento que es analizada posteriormente, cuenta con un total de doce columnas. Los campos son los siguientes: la línea, el tren, la ocupación del convoy, la estación, el número de pasajeros que suben, los viajeros que bajan, el total de usuarios que han utilizado la red de metro hasta ese instante de tiempo, el número acumulado de personas que han hecho un transbordo desde la línea 6 a la 10, el valor acumulado de cambios desde la línea 10 a la 6, el total de transbordos, el tipo horario y la hora. A continuación, en la Figura 6.26 se presenta una pequeña muestra de los resultados obtenidos:

	Línea	Tren	Ocupacion	Estacion	Pasajeros_suben	Pasajeros_bajan	Pasajeros_totales
1389	2	54	42	9	17	5	23899
1390	2	56	12	7	6	6	23905
1391	2	58	15	5	7	3	23912
1392	2	60	9	3	3	1	23915
1393	2	62	5	1	5	0	23920
1394	1	35	120	28	47	39	23920
1395	1	37	144	26	52	34	23972
1396	1	39	132	24	41	35	24013
1397	1	41	126	22	42	36	24055
1398	1	43	169	20	43	34	24098

...

Capítulo 6. Análisis de Resultados

Pasajeros_transbordan_6_10	Pasajeros_transbordan_10_6	Pasajeros_totales_transbordan	Tipo_horario	Hora
415	369	784	Estandar	2024-05-29 07:30:00
415	369	784	Estandar	2024-05-29 07:30:00
415	369	784	Estandar	2024-05-29 07:30:00
415	369	784	Estandar	2024-05-29 07:30:00
415	369	784	Estandar	2024-05-29 07:30:00
415	369	784	Punta de mañana	2024-05-29 07:31:30
415	369	784	Punta de mañana	2024-05-29 07:31:30
415	369	784	Punta de mañana	2024-05-29 07:31:30
415	369	784	Punta de mañana	2024-05-29 07:31:30
415	369	784	Punta de mañana	2024-05-29 07:31:30

Figura 6.26: *Fragmento del data frame que contiene la información del flujo de usuarios. Fuente: Elaboración propia.*

Una vez presentado el contenido de las estructuras que se emplean en el código, se puede comenzar el estudio. Se ha analizado el flujo medio de usuarios que han subido en cada estación de las líneas 6 y 10 a lo largo de la totalidad del experimento. La salida gráfica de dicho trabajo se ilustra en las Figuras 6.27 y 6.28.

Por un lado, en lo que respecta a la línea 6 del metro, los resultados muestran información consistente con lo obtenido en el pasado. Hay una tendencia continuista muy clara con una media que llega hasta los 28 usuarios. Las subidas en las distintas estaciones del recorrido son siempre similares ya que todas pertenecen a la Zona A y cuentan con el mismo coeficiente de multiplicación por ubicación. En la Figura 6.27 se muestra de manera ilustrativa lo comentado en el párrafo anterior.

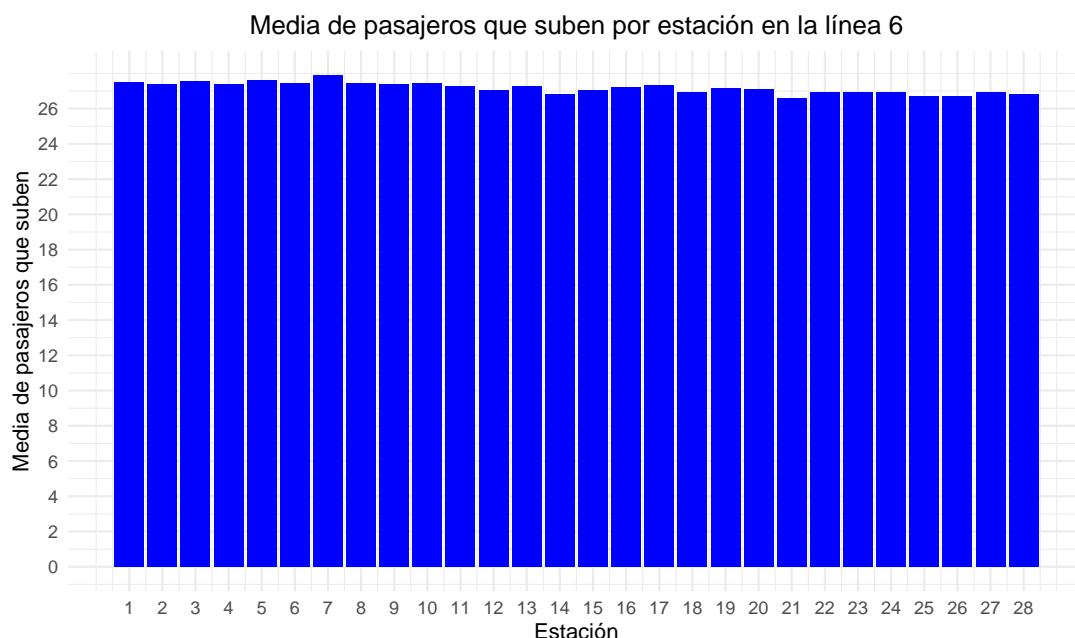


Figura 6.27: *Número medio de pasajeros que suben en cada estación de la línea 6. Fuente: Elaboración propia.*

6.4. Cuarto prototipo

Por otro lado, la línea 10 cuenta con una forma peculiar, que difiere de la de su compañera. Tal y como se puede ver en la Figura 6.28, desde la primera estación hasta la número siete, los valores van creciendo poco a poco pero no son tan altos comparados con las cifras del resto de paradas. Esto ocurre a consecuencia de la situación geográfica en la que están construidas las terminales. Los primeros siete puntos y los dos últimos del trayecto se encuentran en la Zona B1, más alejada del centro de la ciudad y, por lo tanto, el flujo de viajeros que suben es menor que en aquellas estaciones que pertenecen a la Zona A, más céntrica. Además, en la última detención del tren al finalizar el recorrido no se monta ninguna persona en los trenes.

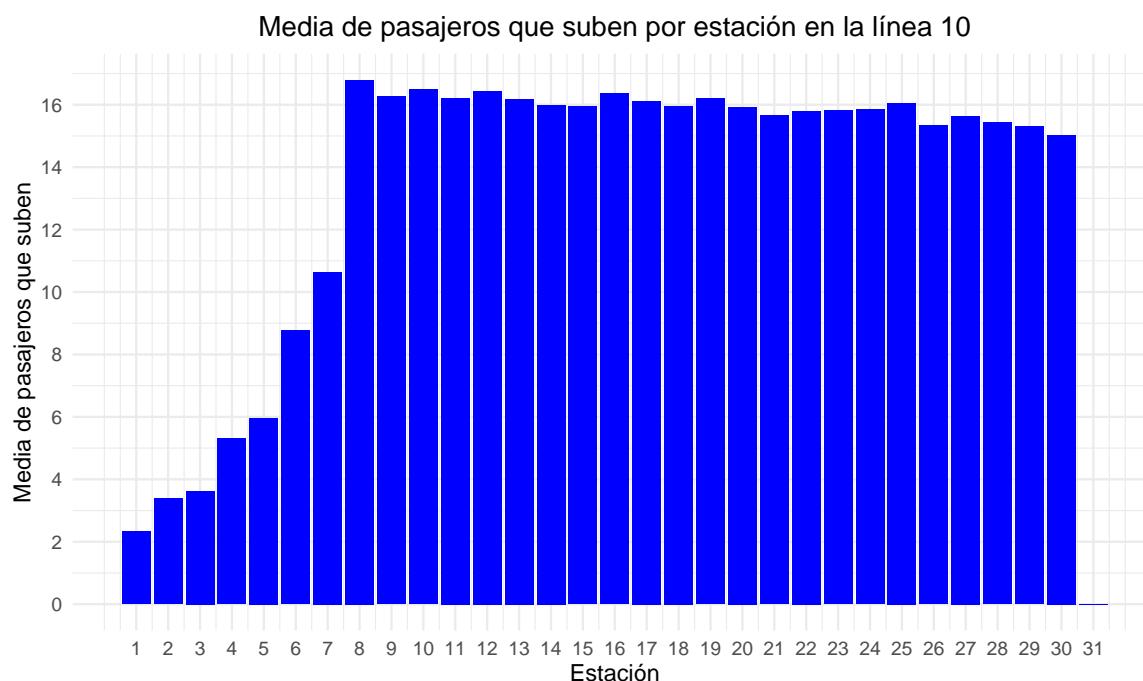


Figura 6.28: *Número medio de pasajeros que suben a los trenes en cada estación de la línea 10.* Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el estudio, se ha realizado de manera paralela a las subidas, un análisis similar con los datos de las bajadas por estación de ambas líneas. La salida gráfica de dicho trabajo se ilustra en las Figuras 6.29 y 6.30.

Por un lado, en cuanto a la línea circular, los datos presentan resultados igualmente consistentes con lo obtenido en el pasado. Hay una tendencia continuista con una media de bajadas que llega, al igual que en las subidas, hasta los 28 usuarios. En las distintas estaciones del trayecto los valores son muy parecidos ya que todas pertenecen a la Zona A y cuentan con el mismo coeficiente de multiplicación por ubicación.

En la Figura 6.27 se muestra de manera ilustrativa lo comentado en el párrafo anterior.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

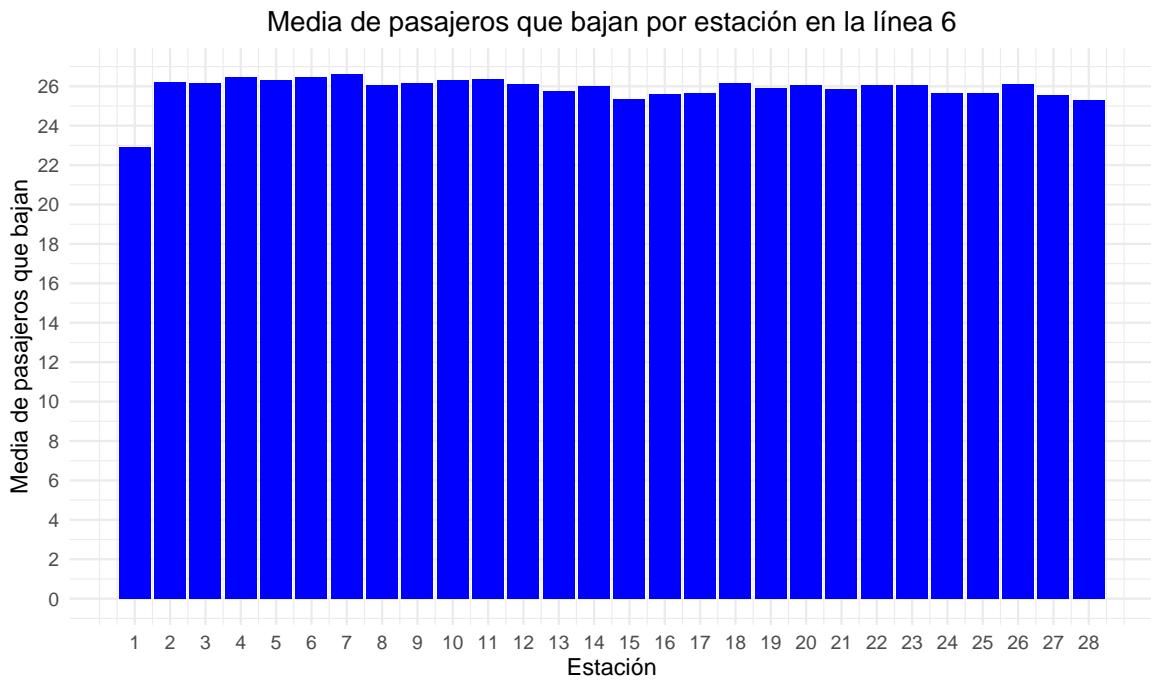


Figura 6.29: *Número medio de pasajeros que bajan en cada estación de la línea 6 a lo largo del tiempo.* Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la L10, al igual que pasaba con las subidas, cuenta con un formato un tanto peculiar. En la ilustración de la Figura 6.30 se puede ver cómo las cifras en todas las estaciones rondan la media de diez pasajeros menos contando con unas cifras algo menores en las paradas lejanas del centro.

No obstante, existe una clara excepción en el caso de la última terminal. En la estación de Puerta del Sur se logran unos números muy altos que rozan la media de los 180. Este curioso efecto es debido a la acumulación progresiva de viajeros que va habiendo en los trenes a consecuencia del menor valor del *lambda* de bajada. Al llegar al final del recorrido y no tratarse de una línea circular, todos los pasajeros que estén montados en el tren deben salir del vehículo.

6.4. Cuarto prototipo

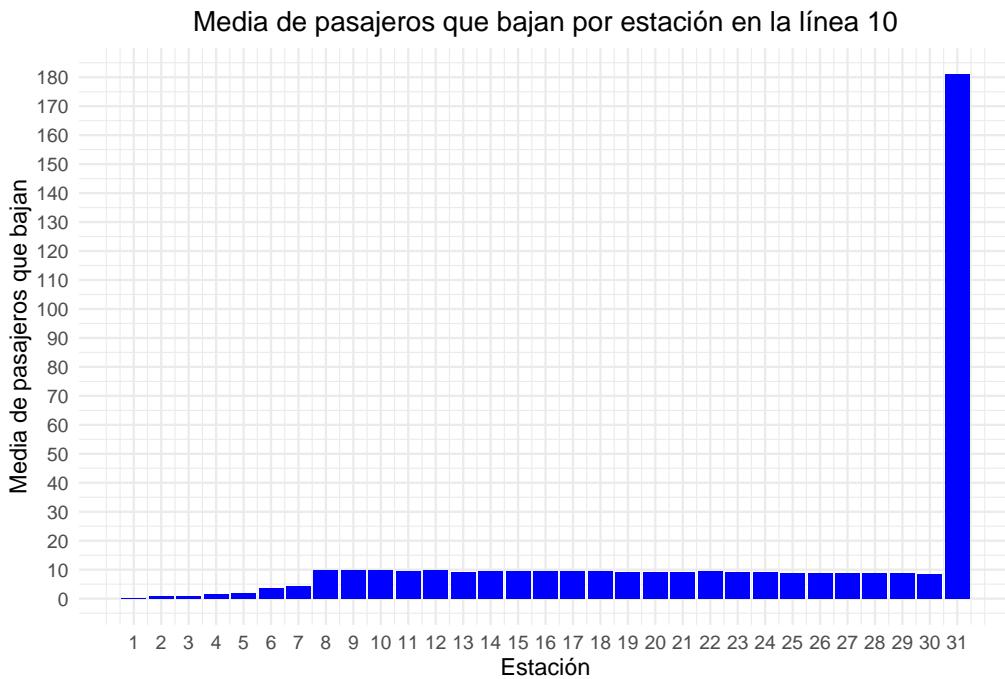


Figura 6.30: *Número medio de pasajeros que bajan en cada estación de la línea 10 a lo largo del tiempo.* Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se ha estudiado el flujo de pasajeros que suben a lo largo del tiempo de simulación, desde las 06:00 de la mañana hasta las 02:00 de la madrugada del día siguiente, en las distintas líneas de la red de transporte. La visualización de dicho trabajo se presenta en las Figuras 6.31 y 6.32.

En este prototipo se ha tomado la decisión de cambiar el origen de coordenadas con respecto a la versión tres del sistema. Mientras que en la anterior se dividía el período de funcionamiento a partir de las 00:00 de la noche para observar el corte de los datos, en este caso el punto de origen está en el inicio de la simulación.

En primer lugar, en la línea 6 los resultados muestran datos que se ajustan a lo esperado. A diferencia de lo que ocurría en versiones anteriores, como el tercer prototipo en el que las medias eran consistentes a lo largo de las horas, en este caso se dan agrupaciones de acuerdo con el rango horario en el que se encuentre la simulación. Tal y como se aprecia en la Figura 6.31, en las franjas que se denominan como “punta”, ya sea de mañana, mediodía o tarde las cifras se elevan bastante por encima de las “estándar” y mucho más si se habla de las “valle”, que se dan a partir de las 23:00 de la noche.

En la hora punta de las mañanas existe mucho trasiego de personas que van a trabajar, repitiéndose este efecto a mediodía, en torno a las 14:00 de la tarde, y por la tarde a partir de las 18:00, coincidiendo con la vuelta a casa de los trabajadores.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

Cabe destacar, que existe una clara tendencia de los valores por segmento de tipo horario, dentro de los cuales los números se mantienen dentro de rangos concretos.

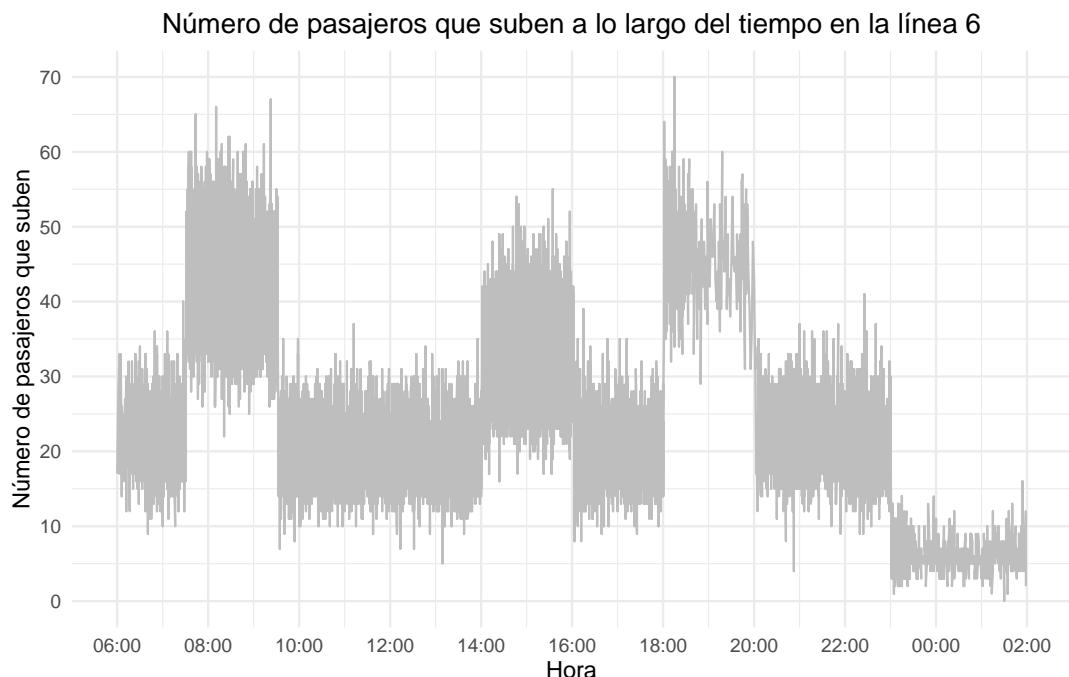


Figura 6.31: *Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.*

En segundo lugar, se puede apreciar en la Figura 6.32 cómo el total de pasajeros que se suben a línea 10 a lo largo del tiempo es inferior al de su homóloga. Esto se debe a que este recorrido posee estaciones en la Zona B1 que solo son utilizadas, generalmente, por personas que viven en zonas del extrarradio, mientras que a las paradas de la Zona A acceden tanto los que habitan en ese área como los que no, pero que deben visitarla para ir al trabajo.

Al igual que pasaba con la línea 6, se diferencian visualmente los diferentes tipos de horario existentes aunque en este caso se encuentran un poco más dispersos y no se observan con tanta claridad. Destacan, sobre todo, los valores de la hora punta de la tarde que se alzan sobre el resto.

6.4. Cuarto prototipo

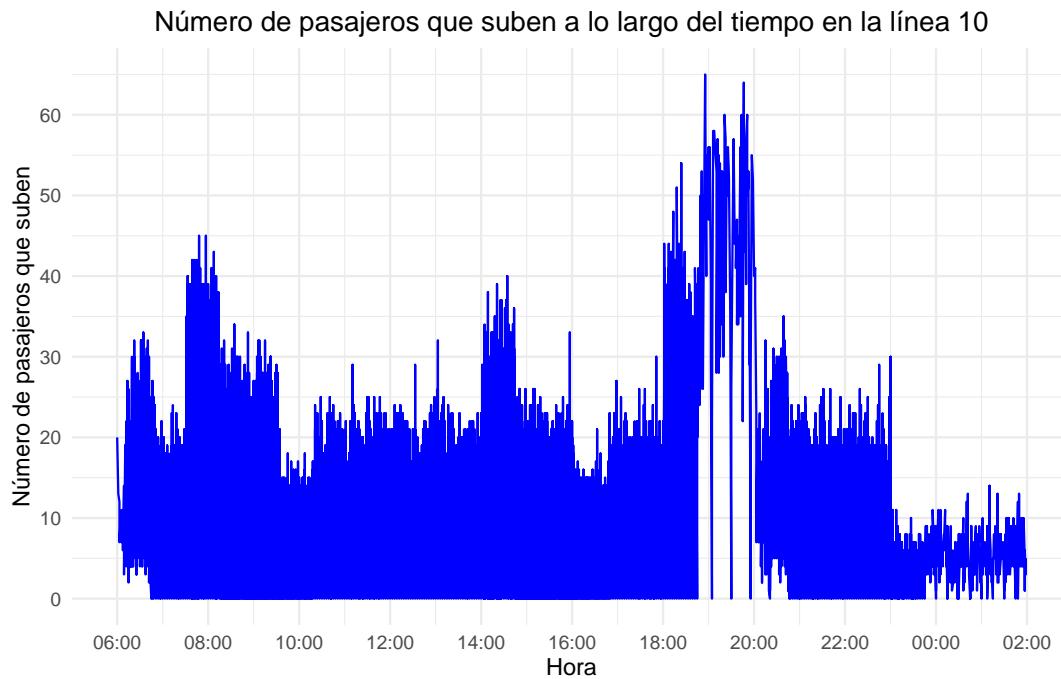


Figura 6.32: *Número de pasajeros que suben a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.*

Posteriormente, se ha analizado el tránsito de viajeros que han bajado a lo largo del tiempo de simulación, desde las 06:00 de la mañana hasta las 02:00 de la madrugada del día siguiente, en los distintos trayectos de la red de transporte. La visualización de dicho trabajo se presenta en las Figuras 6.31 y 6.32.

Por un lado, en la línea 6 los resultados son parecidos a los de las subidas, con agrupaciones de acuerdo con el rango horario en el que se encuentre la simulación. Tal y como se muestra en la Figura 6.31, en las franjas que se denominan como “punta”, ya sea de mañana, mediodía o tarde las cifras se elevan bastante por encima de las “estándar” y mucho más si se habla de las “valle”, que se dan a partir de las 23:00 de la noche.

Cabe mencionar que existe un efecto en ciertas paradas que hace que se tomen valores cercanos a cero o incluso cero, como en las primeras horas de la mañana en las que los trenes comienzan su servicio y van vacíos, por lo que no puede bajarse nadie.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

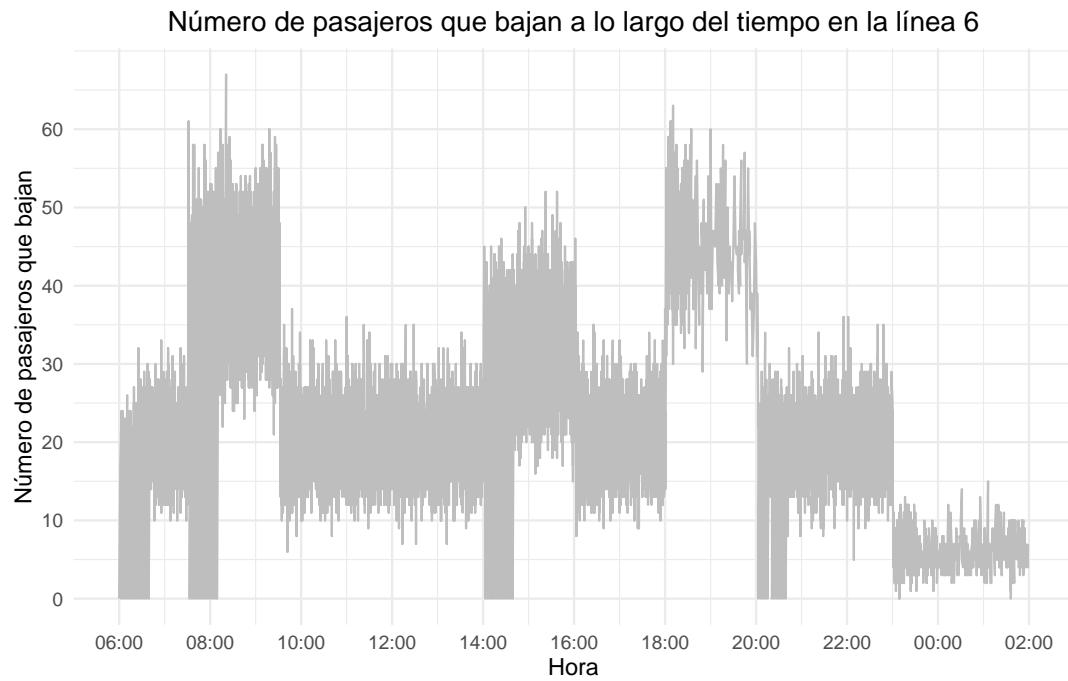


Figura 6.33: Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 6 del sistema. Fuente: Elaboración propia.

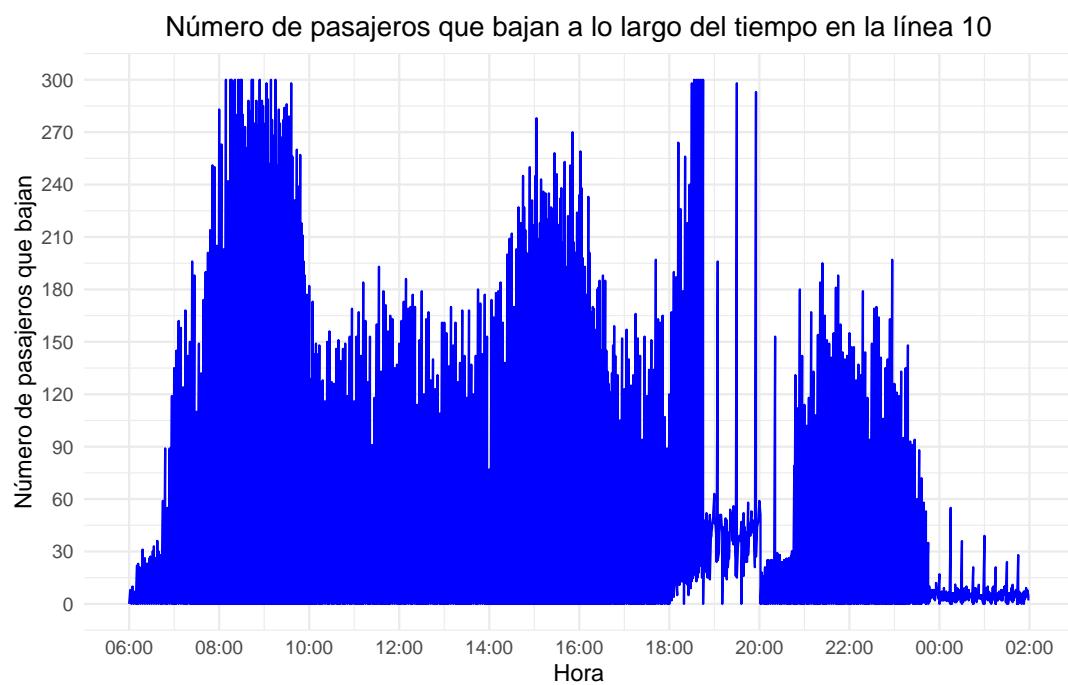


Figura 6.34: Número de pasajeros que bajan a lo largo del tiempo en la línea 10 del sistema. Fuente: Elaboración propia.

6.4. Cuarto prototipo

Por otro lado, se puede ver en la Figura 6.34 cómo el total de pasajeros que se bajan en línea 10 varía bastante. Se tienen picos de datos que, como ya se ha mencionado anteriormente en este trabajo, tiene que ver con la forma de programar el sistema que hace que se tiendan a acumular pasajeros hasta el final del trayecto.

Al igual que ocurría con la línea 6, se distinguen los distintos tipos de horario que hay aunque en este caso se encuentran un poco más dispersos y no se observan de manera tan clara.

Para proseguir con el experimento y en relación con los apartados inmediatamente anteriores, se ha visto la media de usuarios que suben y bajan en cada línea en función del tipo de horario. Para ello se han sacado los gráficos que se disponen en las Figuras 6.35 y 6.36.

Las subidas reflejan lo que ya estábamos viendo hasta el momento y es el mayor uso de la línea 6 frente a la 10, representadas en gris y azul en la Figura 6.35, por su mayor cercanía con el centro de la capital española. En los momentos estándar del día existe una media de subidas de aproximadamente 20,70 para la circular, mientras que esta cifra desciende hasta los 11,40 usuarios para la L10. El punto más alto que se encuentra es en el horario de punta de la tarde con 46,00 viajeros de media para la L6 y 33,10 para la L10. Las horas valle cuentan, como es lógico y coherente, con el punto más bajo con cifras de 6,30 y 4,50 para la L6 y la L10, respectivamente.

Media de pasajeros que suben en cada línea por tipo de horario

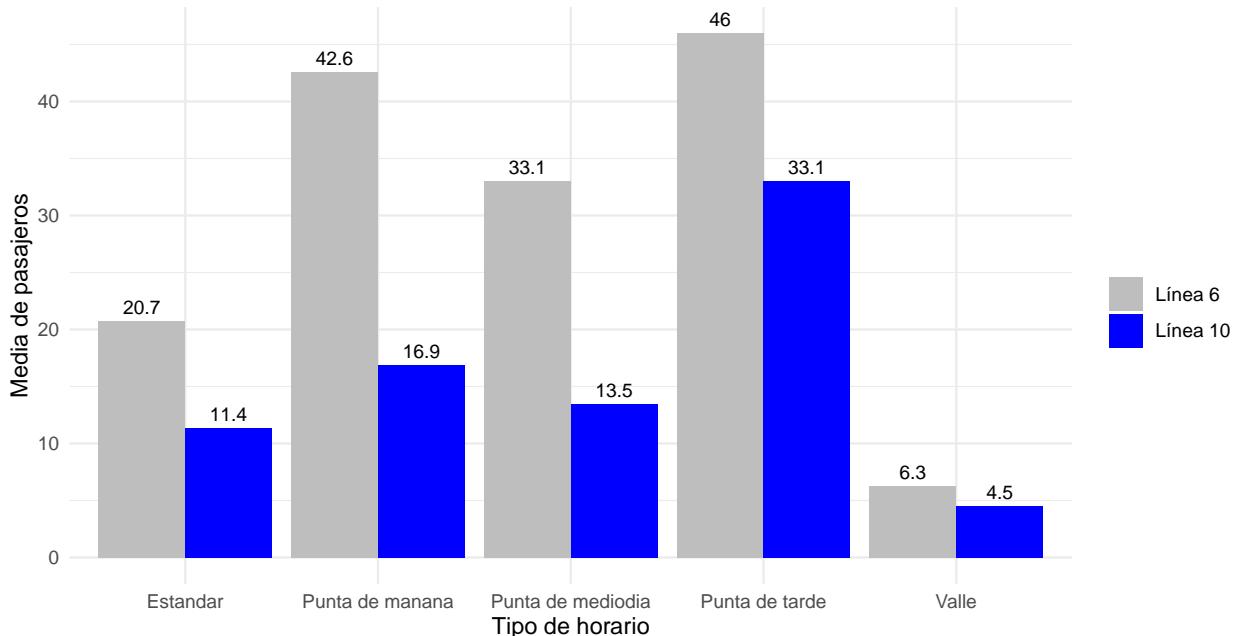


Figura 6.35: Número medio de pasajeros que suben en cada línea por tipo de horario. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

Las bajadas dispuestas en la Figura 6.35 continúan afirmando los pensamientos anteriores que indican una dominancia en uso de la L6 frente a la L10. En los momentos estándar del día existe una media de subidas de aproximadamente 19,90 para la circular, mientras que esta cifra desciende hasta los 11,70 viajeros que descienden de los trenes para la L10. El punto máximo se encuentra en el horario de punta de la tarde con 45,70 viajeros de media para la L6 y 35,80 para la L10. Las horas valle cuentan, como es lógico y coherente, con el punto más bajo con cifras de 6,00 y 6,30 para la L6 y la L10, respectivamente.

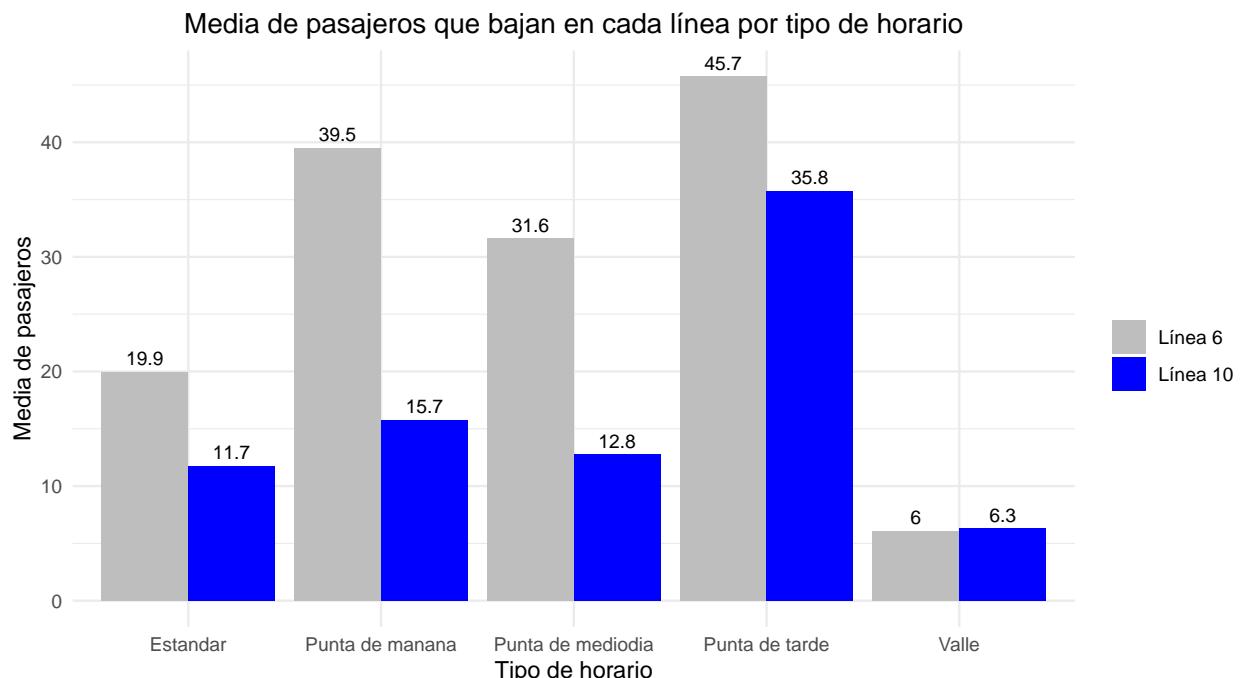


Figura 6.36: *Número medio de pasajeros que bajan en cada línea por tipo de horario. Fuente: Elaboración propia.*

Los datos de ocupación media de la Figura 6.37 señalan una cantidad superior de trenes de la línea 6 ocupados en un porcentaje mayor que en el caso de la L10. Si bien, en la L10 se iban acumulando pasajeros, solo en momentos concretos se llega a números altos y en muchas ocasiones los valores son cero, dado que en la primera estación no se baja nadie durante toda la simulación. Es por esto que la media se ve reducida.

Mientras tanto, en el circuito ‘infinito’ de la circular solo se producen ocupaciones nulas en el momento de creación de los convoyes, haciendo que la media aumente considerablemente.

6.4. Cuarto prototipo

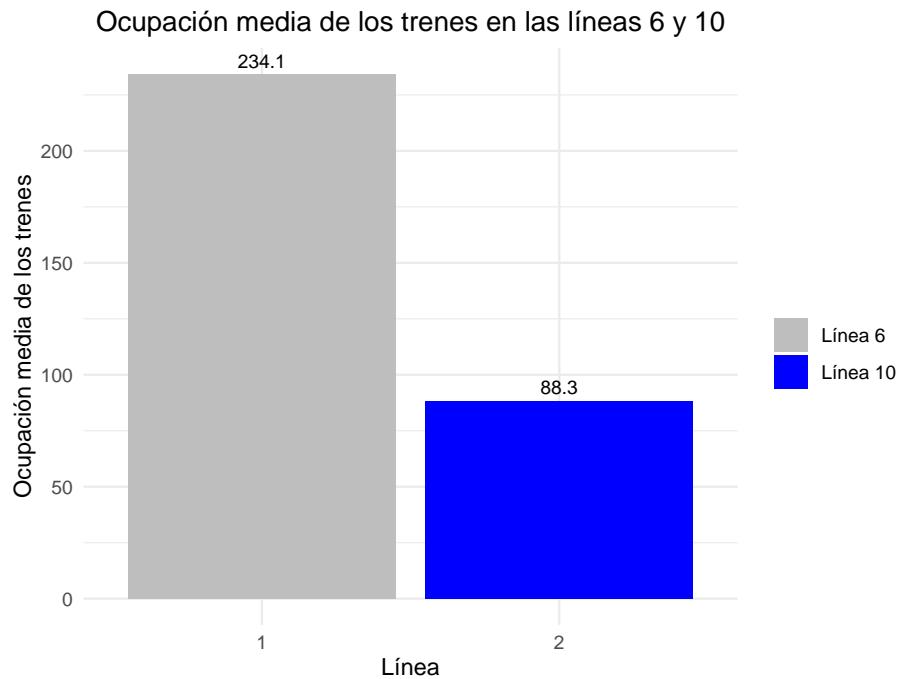


Figura 6.37: *Ocupación media de los trenes en las líneas 6 y 10*. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se llega al apartado de los transbordos. Los cambios de línea conforman una parte clave en el flujo de pasajeros, que presentan la necesidad de modificar su recorrido, ampliando los lugares a los que se puede viajar sin tener que salir de la red de transporte.

En la Figura 6.38 se ilustra la evolución del número de pasajeros que realizan transbordos a lo largo del día, tanto desde la línea 6 a la 10 como en sentido contrario. En gris aparece dibujado el volumen acumulado de usuarios que han llevado a cabo un cambio de trayecto desde la línea circular a la 10 y en azul el movimiento contrario, es decir, desde la L10 hasta la L6. A diferencia de lo que se podía encontrar en el tercer prototipo, en el que el relleno de ambos casos era prácticamente idéntico, en esta versión, al añadirse los factores de ubicación y de tipo de horario, se ve cómo los transbordos de la L10 a la L6 son muy superiores a los de la L6 a la L10. La evolución crece sobre todo en las horas clave de mayor trajín de movimiento a las 08:00 de la mañana y a las 14:00 de la tarde, principalmente.

Cabe mencionar que las tasas de transbordo no son constantes, sino que se calculan con la función *sample* de R, que toma una muestra aleatoria a raíz de un conjunto específico de datos que, en el caso dado, es el número de pasajeros que bajan de un tren en una estación que cuenta con la posibilidad de cambiar de línea. Como la cifra de viajeros que descienden del convoy se encuentra influenciada por la hora y la ubicación, aunque se emplee una función de aleatoriedad, el volumen de usuarios que harán el transbordo también lo estará.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

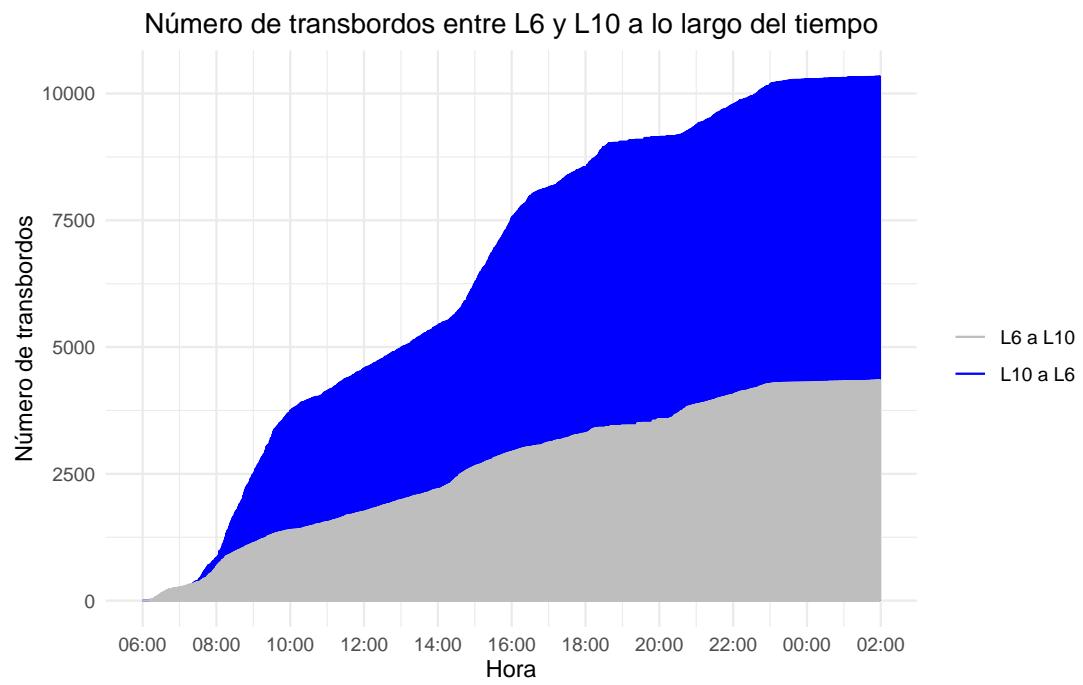


Figura 6.38: Evolución del número de transbordos entre la línea 6 la 10 a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 7

Conclusiones

El Metro de Madrid es una de las redes de ferrocarril metropolitano más completas del mundo y, por lo tanto, cuenta con cientos de variables que afectan en tiempo real al funcionamiento del sistema. Es por esto que llevar a cabo una simulación realista al completo de este medio de transporte es una tarea ardua y requiere de un tiempo muy prolongado, una dedicación exclusiva y conocimientos de expertos.

7.1. Evaluación de los objetivos del TFG

Con este proyecto se han cumplido de manera satisfactoria los objetivos propuestos al inicio del documento. El desarrollo incremental por prototipos ha permitido abordar de manera estructurada y eficiente el diseño y la construcción del algoritmo, permitiendo ajustar y mejorar el programa iterativamente.

Además, se han establecido con precisión las estructuras de datos y se ha implementado un sistema de ficheros de *log* que ha sido fundamental para la recopilación y el análisis de información de la simulación.

En cuanto a la simulación de las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid para diferentes franjas horarias, se han modelado y simulado diversos escenarios que reflejan las condiciones reales de la red de transporte y se han llevado a cabo multitud de análisis de datos que han permitido una mejor comprensión de las dinámicas y el comportamiento del entramado subterráneo bajo diferentes circunstancias. A los tipos de horarios se le ha sumado, además, la distinción entre zonas de ubicación de las estaciones, lo que ha proporcionado una mayor complejidad y enriquecimiento del estudio.

7.2. Líneas futuras

En este trabajo solo se ha podido incluir una pequeña parte de la intrincada red y su gran número de componentes. En futuras ampliaciones de este documento se podría continuar incorporando recursos al flujo de pasajeros como pueden

Capítulo 7. Conclusiones

ser los tiempos de espera o la distinción de pasajeros con discapacidades que deban esperar trenes determinados para poder acceder, entre otros ejemplos.

Un detalle que se podría implementar en próximas versiones es la especialización de las estaciones, impulsando coeficientes multiplicadores más específicos y dividiendo las zonas ya existentes en áreas más concretas que adapten, sobre todo, a la intensidad del flujo de pasajeros. Igualmente, se podría desviar la atención un poco del componente principal y centrar el foco en aspectos diferentes como pueden ser los trenes, incluyendo diferentes velocidades, averías que hagan que los vehículos se tengan que detener entre dos estaciones, etc.

Como se puede observar, existen multitud de pequeños detalles que se podrían ir incluyendo poco a poco, de tal manera que se podría llegar a alcanzar un alto nivel de similitud con la apariencia real del sistema. Una vez logrado este punto, se podría contribuir a la optimización global del transporte urbano, ofreciendo un servicio más eficiente y satisfactorio para los usuarios.

7.3. Evaluación del proceso de realización del proyecto

El proceso de realización del Trabajo de Fin de Grado ha sido una experiencia enriquecedora, aunque no exenta de desafíos. La temática, que implica la simulación de las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid, presentaba desde un inicio cierta complejidad y ha resultado en ciertas ocasiones difícil debido a la necesidad de integrar una amplia gama de variables y de asegurar la precisión del modelo.

Por un lado, con proceso de validación he podido evaluar el grado de fidelidad que se deseaba lograr para el prototipo final. Además, he llevado a cabo un análisis de sensibilidad para determinar cómo variaciones en las entradas del modelo afectaban a los resultados, lo que ha permitido identificar áreas críticas que requerían especial atención.

Por otro lado, he verificado que el modelo implementado fuese consistente con sus especificaciones y que el código del programa reflejara correctamente el modelo conceptual diseñado. Este proceso ha incluido la revisión exhaustiva del software para confirmar que se satisficieran los requisitos definidos y que se obtuvieran resultados lógicos.

Finalmente, cabe destacar que gracias al seguimiento de una planificación bien estructurada y a las reuniones periódicas que he ido teniendo con el tutor del proyecto, he conseguido abarcar todos los puntos deseados de forma exhaustiva y eficiente. Este proceso me ha permitido, no solo alcanzar las metas establecidas, sino también, ampliar mis conocimientos y habilidades, convirtiéndose en una experiencia de aprendizaje de un valor incalculable.

7.4. Análisis de impacto

Para finalizar este documento, a continuación, se va a analizar el impacto que este proyecto ha tenido o podría tener en diversos ámbitos:

7.4. Análisis de impacto

- Impacto personal: este trabajo me ha supuesto todo un reto debido a mi poca experiencia en programación en R y mi desconocimiento del mundo de las simulaciones. No obstante, la incertidumbre y el deseo por descubrir nuevos ámbitos tecnológicos me han impulsado para realizar el proyecto lo mejor posible, impactando directamente en el ámbito personal.
- Impacto empresarial: la implementación de un proyecto que simula las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid podría en futuros desarrollos emplearse para mejorar significativamente la eficiencia operativa de la red de transporte, ahorrando en costes y suponiendo una ventaja de tipo empresarial.
- Impacto social: al utilizar el sistema para optimizar la gestión del tráfico de trenes y la distribución de recursos, además de reducir costes, se podría mejorar la calidad del servicio ofrecido a los usuarios, impactando de manera directa al sector social.
- Impacto económico: como ya se ha mencionado anteriormente, el uso de la simulación para optimizar el metro de la ciudad, supone un ahorro económico claro pudiendo reducirse los precios y la necesidad de inversión.
- Impacto medioambiental: la mejora en la eficiencia del metro puede contribuir a una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Con este trabajo se trata de fomentar el uso del transporte público disminuyendo la dependencia de vehículos privados, lo que ayudaría a reducir la congestión del tráfico y la contaminación ambiental.
- Impacto cultural: el presente documento trata de ofrecer información y conocimiento acerca del Metro de Madrid, impulsando su uso. Un sistema de metro eficiente puede facilitar el acceso a actividades culturales y de ocio en la ciudad, promoviendo un mayor intercambio cultural entre la población.

Por último, en referencia a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 [22], el presente documento se encuentra directamente relacionado con el cuarto objetivo de “Educación de calidad” que trata de “Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos”. Actualmente, mucha de la información y documentación que se utiliza con fines educativos se localiza en internet, por lo que la disponibilidad abierta de este proyecto con conocimientos contrastados sobre el Metro de Madrid ofrece la posibilidad de adquirir nuevas perspectivas en este ámbito de manera equitativa e inclusiva para todo el mundo, promoviendo un aprendizaje igualitario.

Además, también se puede hacer referencia al objetivo once de “Ciudades y comunidades sostenibles” que intenta “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles” y al número trece de “Acción por el clima” que impulsa “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” pues la finalidad futura de este trabajo es su continuación y desarrollo para impulsar una red de metro más eficiente y segura para todos.

Bibliografía

- [1] L. Leemis y S. Park, *DISCRETE-EVENT SIMULATION: A FIRST COURSE*. Wiley, 2004.
- [2] J. A. Sokolowski y C. M. Banks, *Principles of Modeling and Simulation*. Wiley, 2009.
- [3] Ludiana. «El Metro de Madrid: Curiosidades de 100 años bajo el suelo madrileño». (s.f.), dirección: <https://ludiana.com/curiosidades-del-metro-de-madrid/> (visitado 05-03-2024).
- [4] R. Cedrés. «UN POCO DE HISTORIA TRANVIARIA». (2021), dirección: <https://www.cedres.info/2021/04/un-poco-de-historia-tranviaria.html#:~:text=El%20primer%20tranv%C3%A3a%20con%20tracci%C3%B3n,instal%C3%B3n%20en%20Madrid%20en%201871.&text=Thomas%20Davenport%2C%20herrero%20de%20Vermont,un%20tranv%C3%A3a%20medante%20bater%C3%A3a%20el%C3%A9ctrica>. (visitado 05-03-2024).
- [5] M. M. Maynar y F. J. G. Fernández. «Métodos de construcción de túneles ferroviarios». (2005), dirección: <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=265#:~:text=Tambi%C3%A9n%20conocido%20como%20m%C3%A9todo%20belga,permitir%20hormigonar%20toda%20la%20b%C3%B3veda> (visitado 06-03-2024).
- [6] TeleMadrid. «Metro de Madrid: refugio, vivienda y transporte durante la Guerra Civil Española». (2021), dirección: <https://www.telemadrid.es/programas/a-un-metro-de-ti/Metro-Madrid-Guerra-Civil-Espanola-2-2355684454--20210702115000.html> (visitado 06-03-2024).
- [7] D. Salvador. «BREVE HISTORIA DEL METRO DE MADRID». (s.f.), dirección: <https://www.rutasconhistoria.es/articulos/breve-historia-del-metro-de-madrid> (visitado 05-03-2024).
- [8] Wikipedia. «Metro de Madrid». (2024), dirección: https://es.wikipedia.org/wiki/Metro_de_Madrid (visitado 06-03-2024).
- [9] M. C. Márquez. «Breve historia de los Trenes de Metro de Madrid». (2009), dirección: https://www.crtm.es/media/161812/metro_historico_historia_trenes.pdf (visitado 26-03-2024).

BIBLIOGRAFÍA

- [10] C. MORATA. «Metro de Madrid cerró 2022 con un beneficio de casi 4 millones pese a la subida de la luz». (2023), dirección: <https://www.20minutos.es/noticia/5124862/0/metro-de-madrid-cerro-2022-con-un-beneficio-de-casi-4-millones-pese-a-la-subida-de-la-luz/#> (visitado 07-03-2024).
- [11] M. de Madrid. «Se nos está quedando un Metro muy verde». (2022), dirección: <https://www.metromadrid.es/es/noticia/se-nos-esta-quedando-un-metro-muy-verde?page=3> (visitado 23-03-2024).
- [12] M. de Madrid. «La Comunidad de Madrid celebra el 40 aniversario del servicio de seguridad en Metro». (2023), dirección: <https://www.comunidad.madrid/noticias/2023/05/04/comunidad-madrid-celebra-40-aniversario-servicio-seguridad-metro> (visitado 12-03-2024).
- [13] CAF. «METRO MADRID S/5000». (s.f.), dirección: <https://www.caf.net/es/soluciones/proyectos/proyecto-detalle.php?p=186> (visitado 26-02-2024).
- [14] CAF. «METRO MADRID S/8000/8400 MONOTENSIÓN». (s.f.), dirección: <https://www.caf.net/es/soluciones/proyectos/proyecto-detalle.php?p=186> (visitado 26-02-2024).
- [15] M. de Madrid. «La estación del mes: Cuatro Caminos, Líneas 1, 2 y 6». (2023), dirección: <https://www.metromadrid.es/es/noticia/la-estacion-del-mes-cuatro-caminos-lineas-1-2-y-6#:~:text=En%20concreto%20los%20andenes%20de,escaleras%20mec%C3%A1nicas%20como%20de%20ascensores> (visitado 03-02-2024).
- [16] M. de Madrid. «Díaz Ayuso anuncia la conducción automática de las líneas 6 y 8 de Metro para reducir la duración de los viajes». (2024), dirección: <https://www.metromadrid.es/es/nota-de-prensa/2024-02-20/diaz-ayuso-anuncia-la-conduccion-automatica-de-las-lineas-6-y-8-de-metro-para-reducir-la-duracion-de-los-viajes> (visitado 28-02-2024).
- [17] Wikipedia. «Línea 6 (Metro de Madrid)». (2024), dirección: [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_6_\(Metro_de_Madrid\)](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_6_(Metro_de_Madrid)) (visitado 04-03-2024).
- [18] M. de Madrid. «La Comunidad de Madrid aumenta en 2023 un 16% los viajeros de Metro y roza las cifras previas a la pandemia». (2024), dirección: <https://www.comunidad.madrid/notas-prensa/2024/01/12/comunidad-madrid-aumenta-2023-16-viajeros-metro-roza-cifras-previas-pandemia> (visitado 28-02-2024).
- [19] Madripedia. «Línea 10 (Metro de Madrid)». (2024), dirección: [https://madripedia.wikis.cc/wiki/L%C3%ADnea_10_\(Metro_de_Madrid\)](https://madripedia.wikis.cc/wiki/L%C3%ADnea_10_(Metro_de_Madrid)) (visitado 04-03-2024).
- [20] Wikipedia. «Línea 10 (Metro de Madrid)». (2024), dirección: [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_10_\(Metro_de_Madrid\)](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_10_(Metro_de_Madrid)) (visitado 04-03-2024).

BIBLIOGRAFÍA

- [21] M. de Madrid. «La Comunidad refuerza hasta un 11 % la oferta de trenes en las líneas 1 y 10 de Metro de Madrid por la suspensión del servicio de Cercanías». (2023), dirección: <https://geokeda.es/la-comunidad-refuerza-hasta-un-11-la-oferta-de-trenes-en-las-lineas-1-y-10-de-metro-de-madrid-por-la-suspension-del-servicio-de-cercanias/> (visitado 10-04-2024).
- [22] N. Unidas. «Objetivos de Desarrollo Sostenible». (2024), dirección: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (visitado 30-05-2024).
- [23] A. Guillaumes. «Estacions i intercanviadors». (2024), dirección: <http://estacions.albertguillaumes.cat> (visitado 07-03-2024).
- [24] M. de Madrid. «Líneas y horarios Hospital Infanta Sofía Puerta del Sur Línea 10». (2024), dirección: <https://www.metromadrid.es/es/linea/linea-10#line-main> (visitado 05-03-2024).

Anexos

Apéndice A

Anexo I: pseudocódigo del cuarto prototipo

Capítulo A. Anexo I: pseudocódigo del cuarto prototipo

A continuación, se dispone una simplificación del código principal empleado para el último prototipo de la simulación de las líneas 6 y 10 del Metro de Madrid.

```
Inicio del bucle mientras CONTADORMIN sea menor que DURACIONSIMMIN
    Reinicio de los parámetros de simulación de pasajeros
    Determinar la franja horaria actual
        Si es hora punta de mañana
            Ajustar parámetros según la franja horaria
        Sino, si es hora punta de mediodía
            Ajustar parámetros según la franja horaria
        Sino, si es hora punta de tarde
            Ajustar parámetros según la franja horaria
        Sino, si es hora valle
            Ajustar parámetros según la franja horaria
        Sino
            Asignar parámetros estándar

    Si CONTADORMIN es divisible por la frecuencia de los trenes
        Generar nuevos trenes en cada estación

    Para cada línea en el rango de 1 a NUMEROLINEAS
        Para cada tren existente
            Si el tren está activo y pertenece a la línea actual
                Si es la línea 6
                    Establecer que es la línea 6
                Sino, si el tren está en una estación exterior
                    de la línea 10
                    Establecer que no es la línea 6 y ajustar
                        los parámetros de subida y bajada
                Sino
                    Establecer que no es la línea 6

            Obtener la estación actual del tren
            Si es la primera estación
                Calcular pasajeros que suben
                Si es la línea 6 y hay pasajeros pendientes
                    de la última estación
                    Calcular pasajeros que bajan
                    Actualizar la ocupación del tren y el
                        número de pasajeros en la estación
                Sino
                    Establecer pasajeros en tren y pasajeros
                        que bajan a cero
            Sino, si es la última estación de la línea 10
                Calcular pasajeros que bajan
                Desactivar el tren
            Sino, si es la última estación de la línea 6
                Calcular pasajeros que suben y bajan
```

Actualizar la ocupación del tren y guardar los pasajeros pendientes

Desactivar el tren

Sino

Si hay transbordos pendientes

Verificar si hay transbordos para esta estación y línea

Si hay transbordos

Realizar transbordo y actualizar registros

Calcular pasajeros que suben y bajan

Actualizar ocupación del tren y número de pasajeros en la estación

Mover el tren a la siguiente estación

Si es la penúltima estación de la línea 10

Guardar ocupación del tren para el cálculo de pasajeros que bajan en la última estación

Actualizar el registro de simulación con la información del ciclo

Sino

Pasar al siguiente tren

Incrementar CONTADORMIN por MINUTOSCICLO

Guardar los resultados de la simulación en un archivo CSV y crear gráficas estadísticas.

Apéndice B

Anexo II: listados de las estaciones numeradas

Capítulo B. Anexo II: listados de las estaciones numeradas

B.1. Estaciones numeradas de la línea 6

	Nombre_estacion	Numero_estacion
1	Laguna	1
2	Carpetana	2
3	Oporto	3
4	Opañel	4
5	Plaza Elíptica	5
6	Usera	6
7	Legazpi	7
8	Arganzuela–Planetario	8
9	Méndez Álvaro	9
10	Pacífico	10
11	Conde de Casal	11
12	Sainz de Baranda	12
13	O'Donnell	13
14	Manuel Becerra	14
15	Diego de León	15
16	Avenida de América	16
17	República Argentina	17
18	Nuevos Ministerios	18
19	Cuatro Caminos	19
20	Guzmán el Bueno	20
21	Vicente Aleixandre	21
22	Ciudad Universitaria	22
23	Moncloa	23
24	Argüelles	24
25	Príncipe Pío	25
26	Puerta del Ángel	26
27	Alto de Extremadura	27
28	Lucero	28

Figura B.1: *Listado de las estaciones de la línea 6 numeradas.* Fuente: Elaboración propia.

B.2. Estaciones numeradas de la línea 10

B.2. Estaciones numeradas de la línea 10

	Nombre_estacion	Numero_estacion
1	Hospital Infanta Sofía	1
2	Reyes Católicos	2
3	Baunatal	3
4	Manuel de Falla	4
5	Marqués de la Valdavia	5
6	La Moraleja	6
7	La Granja	7
8	Ronda de la Comunicación	8
9	Las Tablas	9
10	Montecarmelo	10
11	Tres Olivos	11
12	Fuencarral	12
13	Begoña	13
14	Chamartín	14
15	Plaza de Castilla	15
16	Cuzco	16
17	Santiago Bernabéu	17
18	Nuevos Ministerios	18
19	Gregorio Marañón	19
20	Alonso Martínez	20
21	Tribunal	21
22	Plaza de España	22
23	Príncipe Pío	23
24	Lago	24
25	Batán	25
26	Casa de Campo	26
27	Colonia Jardín	27
28	Aviación Española	28
29	Cuatro Vientos	29
30	Joaquín Vilumbrales	30
31	Puerta del Sur	31

Figura B.2: *Listado de las estaciones de la línea 10 numeradas.* Fuente: Elaboración propia.

Apéndice C

Anexo III: descripción completa de las estaciones

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

C.1. Línea 6

Como ya se ha podido ver en el apartado 3.2 del documento, las estaciones que componen la línea 6 son: Laguna, Carpetana, Oporto, Opañel, Plaza Elíptica, Usera, Legazpi, Arganzuela-Planetario, Méndez Álvaro, Pacífico, Conde de Casal, Sainz de Baranda, O'Donnell, Manuel Becerra, Diego de León, avenida de América, República, Argentina, Nuevos Ministerios, Cuatro Caminos, Guzmán el Bueno, Vicente Aleixandre, Ciudad Universitaria, Moncloa, Argüelles, Príncipe Pío, Puerta del Ángel, Alto de Extremadura y Lucero [17].

A continuación se va a desarrollar la descripción completa de todas y cada una de las paradas:

- Laguna: se encuentra en el distrito de Latina, bajo la intersección de las calles Alhambra y Cuart de Poblet. Esta estación fue inaugurada el 1 de junio del año 1983, como la cabecera de la línea 6, hasta que más tarde en el año 1995 dicha línea se convirtiera en circular. Es una estación de la Zona A y cuenta con 3 andenes, 2 laterales y uno central. Además, existen dos vías por las que circulan los vagones de metro, una con dirección a la estación de Lucero y otra a la de Carpetana.

Por otro lado, con respecto a los accesos, esta estación cuenta con 2 entradas o salidas diferentes una a los números pares de Alhambra y otro a los impares, teniendo para este primero acceso por ascensor. Cabe destacar que en esta acción confluye también la línea C5 de Renfe, a la que se puede llegar a través de un acceso diferente a los mencionados anteriormente.

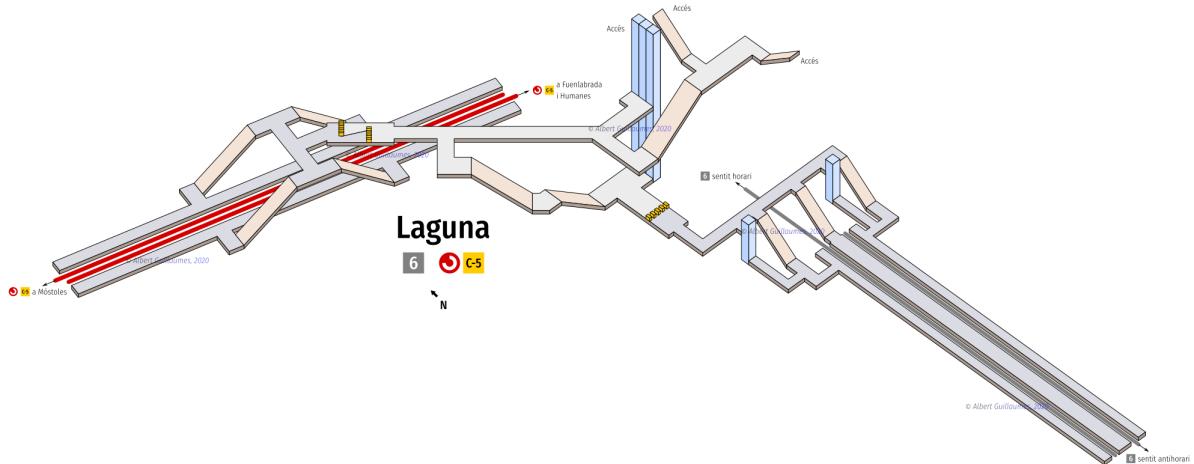


Figura C.1: Representación de la estación de Laguna. Fuente: albertguillaumes.

- Carpetana: se encuentra situada entre los distritos de Carabanchel y Latina, más específicamente en la intersección de la Vía Carpetana con Nuestra Señora de Valvanera y fue inaugurada el 1 de junio de 1983. Se encuentra localizada en la Zona A y cuenta con dos andenes laterales, uno

para cada vía por la que circulan los vagones de metro en dirección a las estaciones Laguna y Oporto.

Esta estación cuenta con 2 accesos uno por el vestíbulo Carpetana a la Vía Carpetana 141 y otro a la Vía Carpetana 139 por el vestíbulo Nuestra Señora de Valvanera, ambos con ascensor.

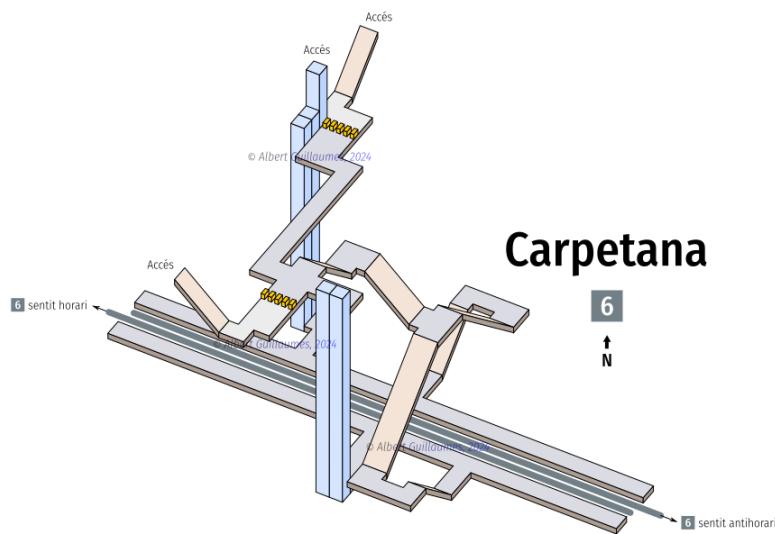


Figura C.2: Representación de la estación de Carpetana. Fuente: [albertguillau-mes](#).

- Oporto: Esta estación se encuentra localizada en el distrito de Carabanchel, bajo la intersección de la calle General Ricardos con la glorieta Valle de Oro. Fue inaugurada el 5 de junio de 1968, al abrirse al público el primer tramo de línea entre Callao y Carabanchel. Más tarde, se reabrió a una profundidad mayor para convertirse en la cabecera de la línea seis hasta la apertura de la estación de Laguna. En esta estación de la Zona A confluyen tanto la línea 6 como las 5, contando con dos andenes laterales y uno central y dos andenes laterales únicamente, respectivamente, en el caso de la línea 6 con dos sentidos, uno a la estación Carpetana y otro a Opañel.

En lo que respecta a los accesos, esta estación cuenta con cuatro de ellos, Valle de Oro, Oca y General Ricardos -pares e impares-, todos ellos sin ascensor. Además, cabe destacar que en la superficie de la glorieta del Valle de Oro existe un Área Intermodal en la que confluyen diferentes líneas de autobuses urbanos de la EMT.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

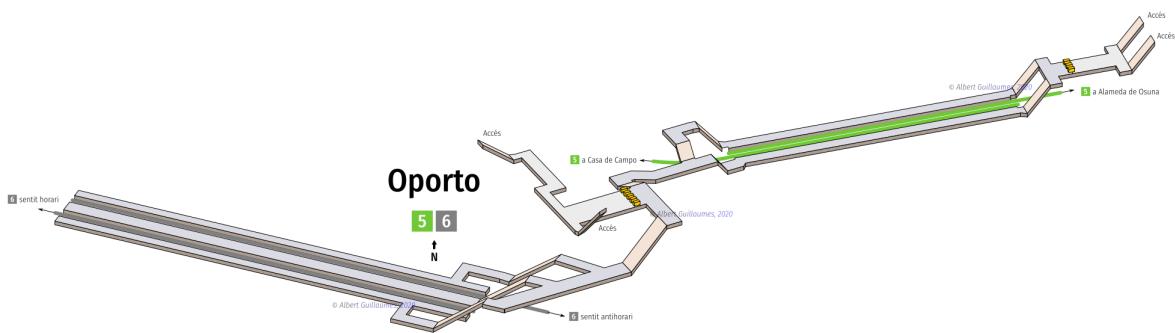


Figura C.3: Representación de la estación de Oporto. Fuente: [albertguillaumes](#).

- Opañel: se encuentra en el distrito de Carabanchel bajo la calle Valle de Oro y abrió al público el día 7 de mayo del año 1981 con el nombre de Elvas qué posteriormente fue modificado para hacer referencia al nombre de un arroyo que existía en el área. La estación cuenta con dos andenes laterales y dos vías una dirección Oporto y otra dirección, Plaza Elíptica. Esta localización está dentro de la Zona A y presenta dos accesos por Portalegre, a través de los números pares y los impares.

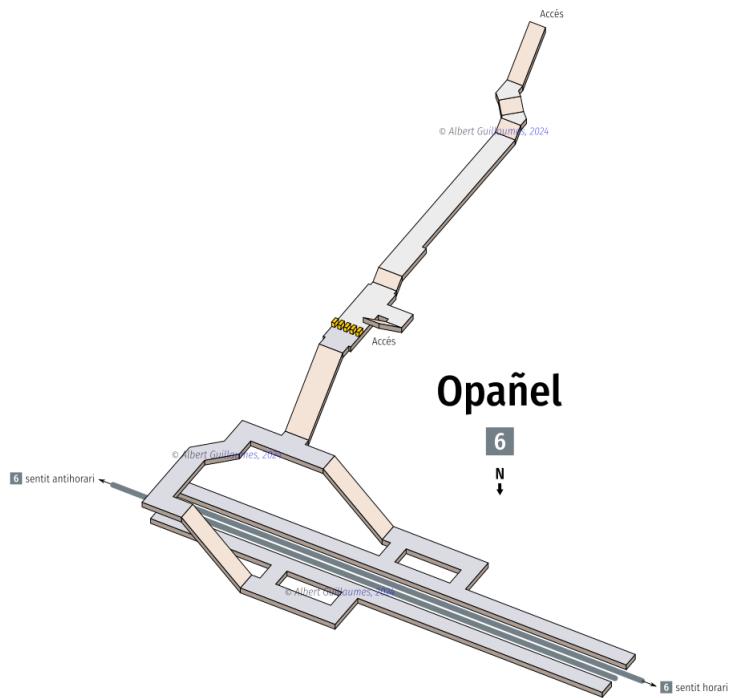


Figura C.4: Representación de la estación de Opañel. Fuente: [albertguillaumes](#).

- Plaza Elíptica: situado entre los distritos de Carabanchel y Usera bajo el barrio de Abrantes, este intercambiador de la Zona A fue inaugurado el 7

de mayo de 1981 y sirve de interconexión entre las líneas 6 y 11 de metro y diversos autobuses tanto urbanos como interurbanos. Cuenta con dos andenes laterales y uno central en la línea 6 y tan solo dos laterales para la 11. Las líneas por las que circulan los metros son dos en dirección a la estación de Opañel y a la de Usera. Existen cuatro accesos al exterior y uno al intercambiador. Con respecto a los primeros, estas entradas y salidas se encuentran en los pares de avenida de Oporto, Plaza Elíptica y Marcelo Usera pares e impares; todos ellos con ascensor.

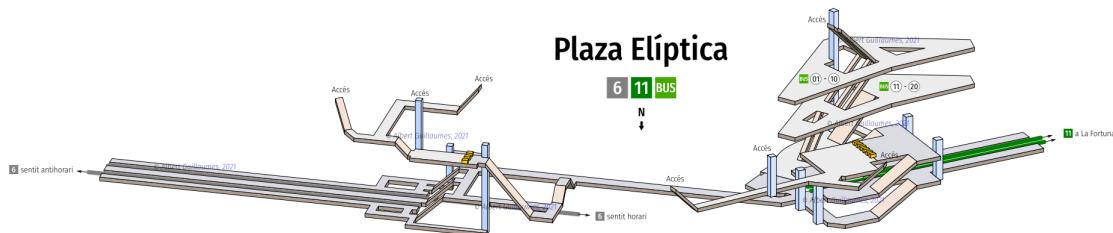


Figura C.5: Representación de la estación de Plaza Elíptica. Fuente: [albertguillaumes](#).

- Usera: esta estación de la Zona A del distrito de Usera se encuentra localizada bajo la calle de Amparo Usera y fue puesta en funcionamiento el 7 de mayo de 1981. Presenta dos andenes uno en dirección Plaza Elíptica y otro Legazpi. Además, cuenta con dos accesos, uno por la calle Amparo Usera y otro por Mirasierra, contando el primero de ellos con ascensor.

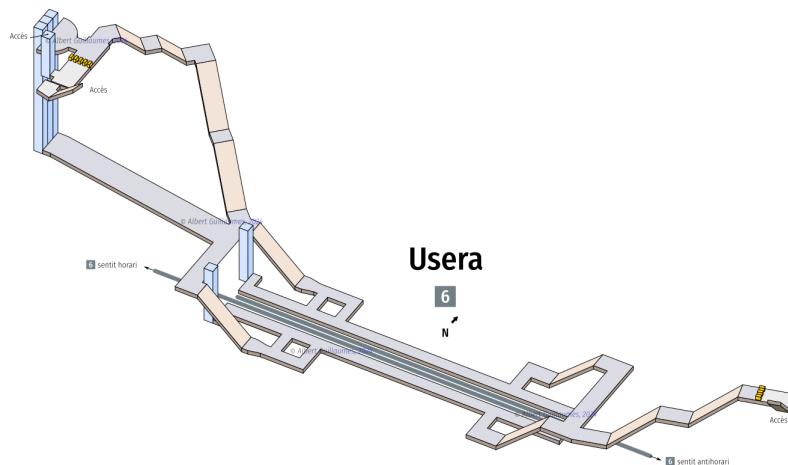


Figura C.6: Representación de la estación de Usera. Fuente: [albertguillaumes](#).

- Legazpi: situada en el distrito de Arganzuela bajo la Plaza de Legazpi, en

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

esta estación confluyen las líneas 6 y 3, inaugurándose esta primera al público el 7 de mayo de 1981, al igual que las tres anteriores. Además, hay conexión con autobuses urbanos e interurbanos. En el caso de la línea 6, existen dos andenes laterales y los trenes circulan en dirección Usera y Arganzuela-planetario. Localizada en la Zona A, presenta dos accesos, uno por Bolívar -con ascensor- y otro por beata María Ana de Jesús.

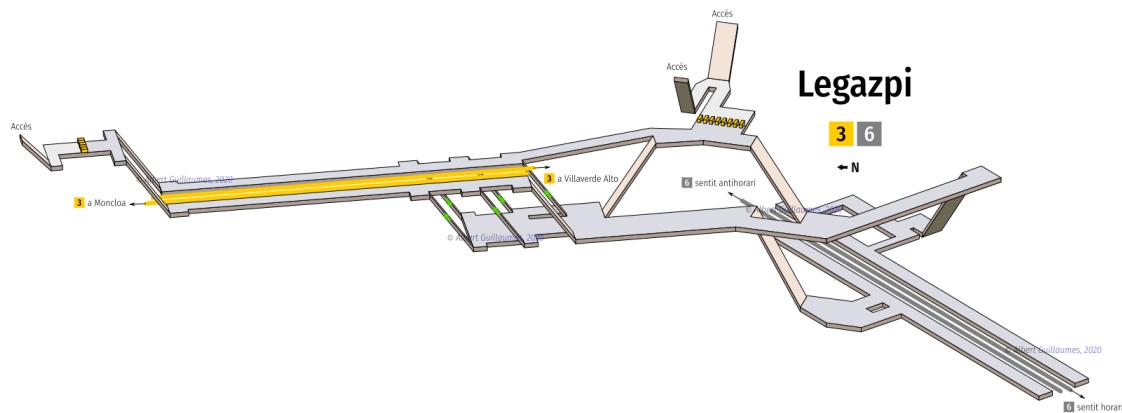


Figura C.7: Representación de la estación de Legazpi. Fuente: albertguillaumes.

- Arganzuela-Planetario: esta estación se encuentra en el distrito de Arganzuela, bajo el barrio de los Metales dentro de la Zona A. Fue inaugurada el 26 de enero de 2007 y, actualmente, cuenta con dos andenes en dirección Legazpi y Méndez Álvaro y un solo acceso por la calle Bronce.

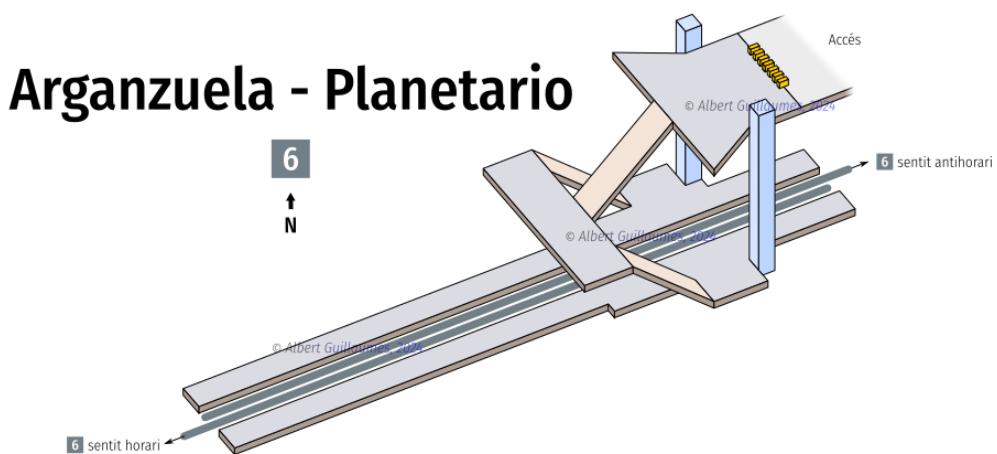


Figura C.8: Representación de la estación de Arganzuela-Planetario. Fuente: albertguillaumes.

- Méndez Álvaro: situada en el distrito de Arganzuela, bajo la intersección de Pedro Bosch y Méndez Álvaro, esta línea abrió al público en mayo de 1981. Se encuentra localizada en la Zona A y sirve de punto de conexión con las líneas C1, C5 y C10 de Cercanías, además de con autobuses urbanos e interurbanos.

Esta estación cuenta con dos andenes en dirección Arganzuela-Planetario y Pacífico. En lo que respecta a los accesos, por un lado, actualmente existen tres entradas y salidas al exterior a través de los números pares e impares de Méndez Álvaro y de la calle Pedro Bosch.

Por otro lado, se dan accesos a la Renfe y al intercambiador de autobuses.

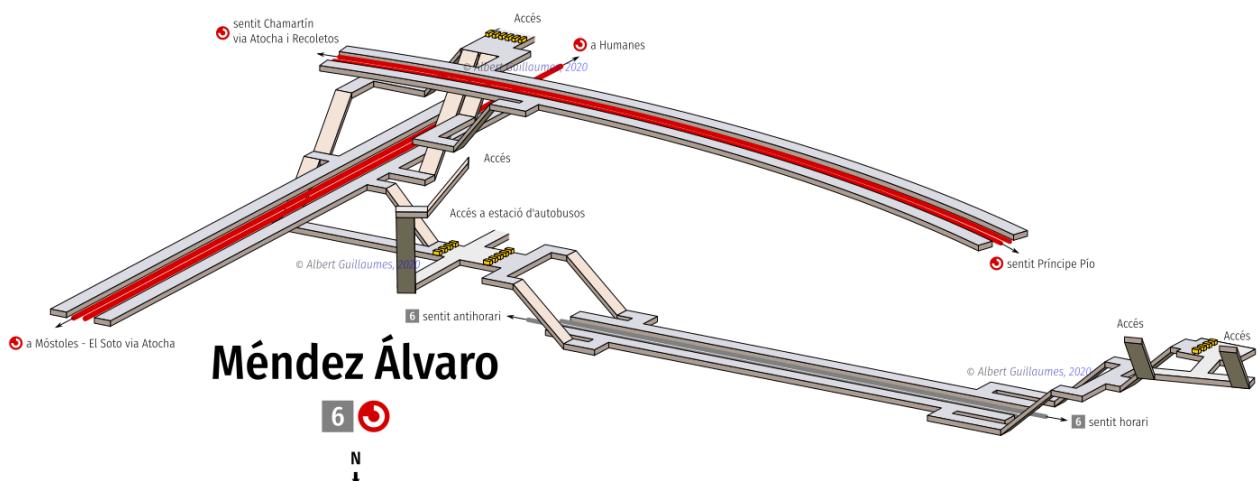


Figura C.9: Representación de la estación de Méndez Álvaro. Fuente: albertguillaumes.

- Pacífico: localizada en el distrito de Retiro, bajo la avenida de la ciudad de Barcelona con la calle del Doctor Esquerdo, esta estación de la Zona A, donde confluyen las líneas 6 y 1 de metro, fue inaugurada el 11 de octubre de 1979. Si bien los andenes de la segunda tuvieron su apertura mucho antes, el 8 de mayo de 1923.

A día de hoy, la primera cuenta con dos andenes laterales y uno central y la segunda con dos andenes laterales. En el caso de la línea 6, las direcciones de las vías son hacia la estación de Méndez, Álvaro y Conde de Casal. Existen tres accesos disponibles, dos por Doctor Esquerdo (pares e impares, este último con ascensor) y un tercero por Sánchez Barcaiztegui.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

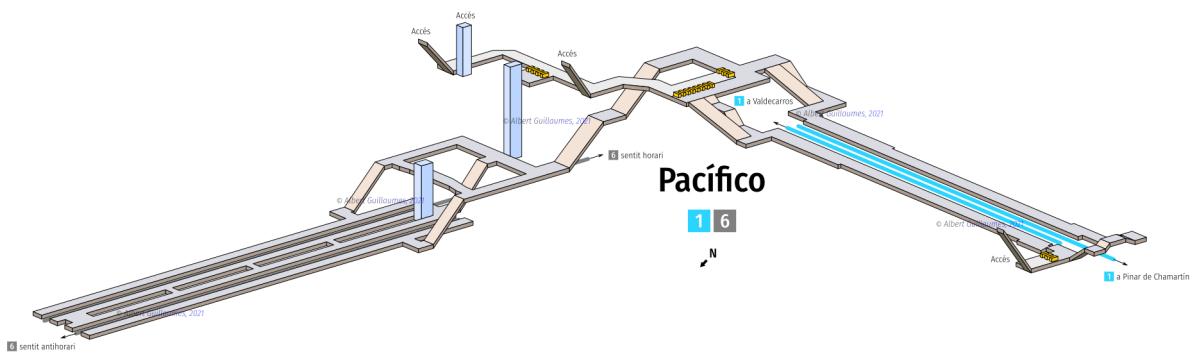


Figura C.10: Representación de la estación de Pacífico. Fuente: albertguillaumes.

- Conde de Casal: ubicada en el distrito Retiro, la estación de Conde de Casal se encuentra en la confluencia de las calles de Doctor Esquerdo con Avenida del Mediterráneo.

Inaugurada el 11 de octubre de 1979, esa estación de la Zona A cuenta con dos andenes laterales en dirección a Pacífico y Sainz de Baranda. Presenta cuatro accesos, tres por Doctor Esquerdo (pares, impares y Plaza Conde de Casal) y un último por Conde de Casal (con ascensor).

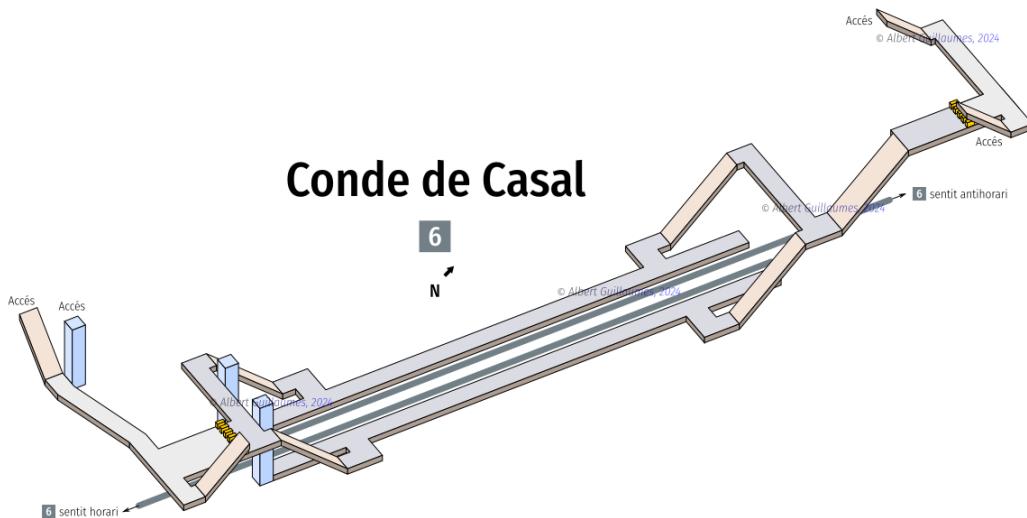


Figura C.11: Representación de la estación de Conde de Casal. Fuente: albertguillaumes.

- **Sainz de Baranda:** esta estación está situada en la Zona A del distrito Retiro bajo la calle de Doctor Esquierdo con Alcalde Sainz de Baranda. Su apertura se llevó a cabo el 11 de octubre de 1979 y hace de correspondencia entre las líneas 6 y 9 de Metro de Madrid. En la línea 6 cuenta con dos andenes laterales y uno central en dirección Conde de Casal y O'Donnell, mientras que en la línea 9 solo presenta dos andenes laterales. Existen accesos por Sainz de Baranda, José Martínez de Velasco y Doctor Esquierdo (además de dos ascensores).

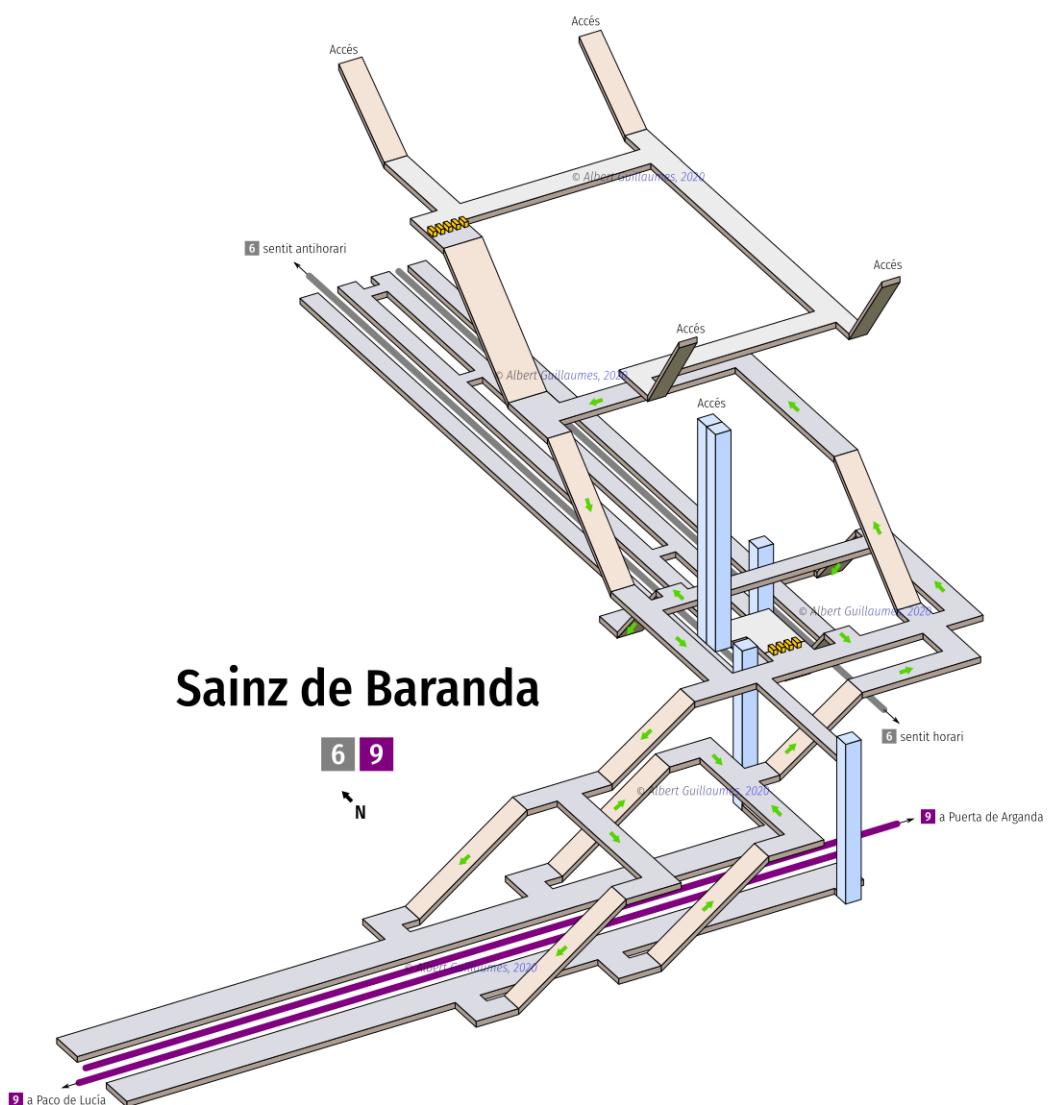


Figura C.12: Representación de la estación de Sainz de Baranda. Fuente: albert-guillaumes.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- O'Donnell: localizada bajo la calle Doctor Esquerdo con Duque de Sesto en los distritos de Salamanca y Retiro, esta estación de la Zona A fue inaugurada el 11 de octubre de 1979 y cuenta con dos andenes en dirección Sainz de Baranda y Manuel Becerra. Cabe destacar que cuenta con conexión a autobuses exprés al aeropuerto. Hay presente cuatro accesos: O'Donnell, Casa de la Moneda y Jorge Juan-Doctor Esquerdo, pares e impares.

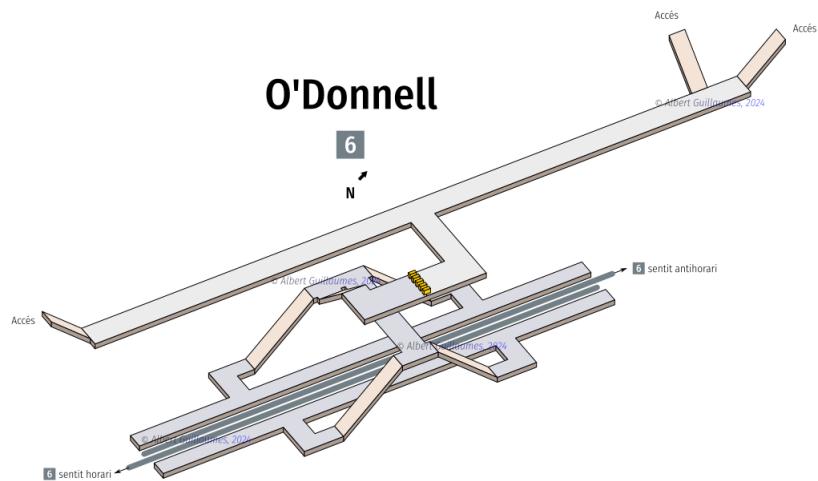


Figura C.13: Representación de la estación de O'Donnell. Fuente: albertguillau-mes.

- Manuel Becerra: esta estación de la Zona A, del distrito de Salamanca que se halla bajo la Plaza de Manuel Becerra fue inaugurada el 11 de octubre de 1979 y actualmente cuenta con interconexión con la línea 2, la cual fue inaugurada el 14 de junio de 1924. Ambas líneas presentan dos andenes laterales, no obstante, la 6 tiene además uno central. Las direcciones de las vías en esta última son O'Donnell y Diego de León y presenta accesos por Doctor Ramón de la Cruz y Doctor Esquierdo.

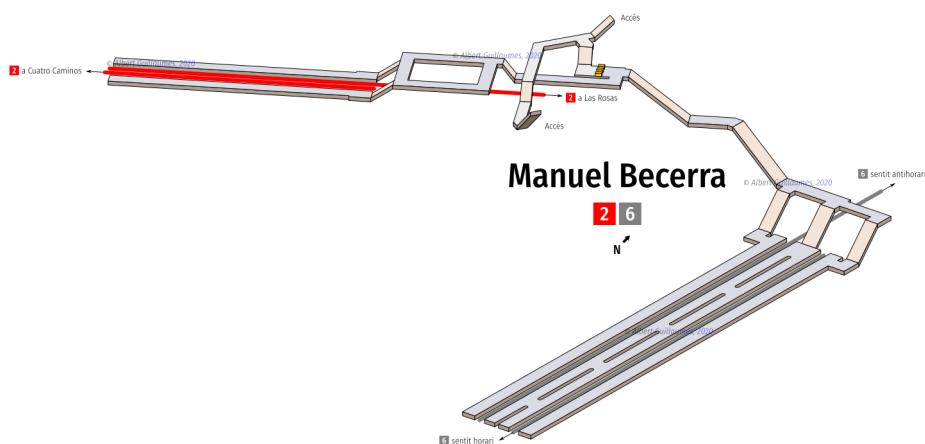


Figura C.14: Representación de la estación de *Manuel Becerra*. Fuente: *albertguillaumes*.

- Diego de León: situada en el distrito Salamanca, bajo las calles de Conde de Peñalver, Juan Bravo y Francisco Silvela, fue inaugurada el 11 de octubre de 1979, al igual que las anteriores. En la actualidad, esta estación de la Zona A tiene correspondencia con las líneas 4 y 5 de metro, además de la 6, todas con dos andenes laterales. Esta última cuenta con dirección hacia Manuel Becerra y Avenida de América.

Al ser la interconexión de tres líneas de metro, el número de accesos es numeroso contando con un total de nueve: Diego de León, Diego de León-rampa, Francisco Silvela pares, Francisco Silvela-rampa, Conde de Peñalver, Alcántara por calle Juan Bravo, Alcántara por calle Francisco Silvela, Azcona y Erazo.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones



Figura C.15: Representación de la estación de Diego de León. Fuente: albertguillaumes.

- Avenida de América: se trata de uno de los intercambiadores más importantes de la red de transportes madrileña. Esta estación de la Zona A localizada entre los distritos de Chamartín y Salamanca, bajo las calles de Francisco Silvela, María de Molina y Príncipe de Vergara, fue inaugurada el 26 de marzo de 1973 con la línea 4, aunque no ha parado de actualizarse hasta hoy en día.

En este intercambiador confluyen con la línea 6, la 4, la 7 y la 9, además de contar con correspondencia con autobuses urbanos, interurbanos y autobuses de largo recorrido. Todas las líneas presentan dos andenes, en el caso de las 6, con dirección a Diego de León y República Argentina. Presenta accesos por Avenida de América pares e impares, por Pedro de Valdivia y un acceso independiente por ascensor.

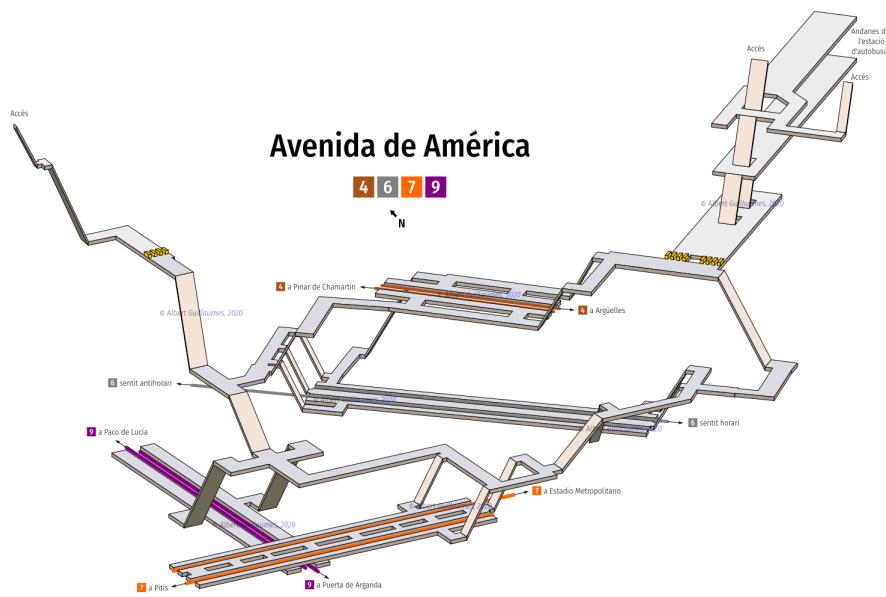


Figura C.16: Representación de la estación de Avenida de América. Fuente: albertguillaumes.

- República Argentina: esta estación de la Zona A del distrito de Chamartín se localiza bajo la plaza de República Argentina y fue abierto al público el 11 de octubre de 1979. Cuenta con dos andenes uno dirección avenida América y otro sentido Nuevos Ministerios. Existen accesos por República Argentina, dos por Joaquín Costa pares y uno por Joaquín Costa impares.

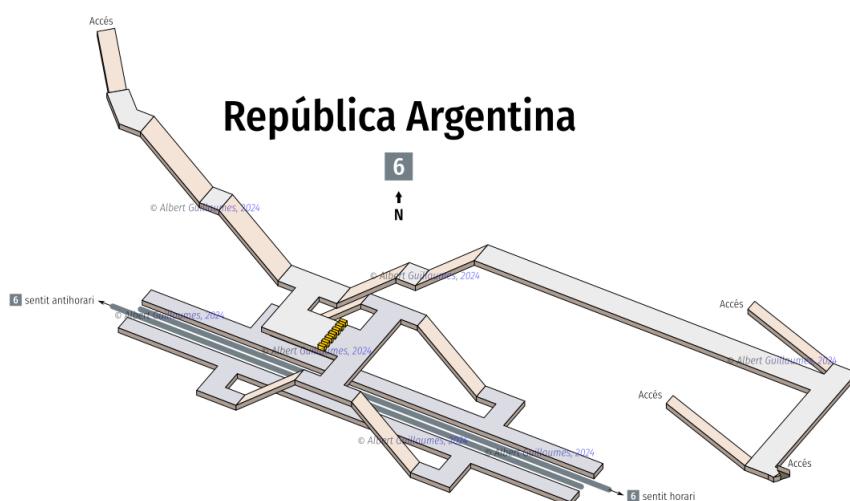


Figura C.17: Representación de la estación de República Argentina. Fuente: albertguillaumes.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- Nuevos Ministerios: es otro de los intercambiadores de referencia del transporte en Madrid. Se encuentra situado entre los distritos de Chamberí, Tetuán y Chamartín en la Zona A bajo los Nuevos Ministerios en el cruce del paseo de la Castellana, Raimundo Fernández Villaverde y Joaquín Costa.

Perteneciente a la red de Cercanías de Madrid, si bien esta estación fue inaugurada en 1967, no fue hasta el año 1979 que el Metro de Madrid llegó a la misma con la línea 6.

En la actualidad, en este espacio confluyen las líneas 6, 8 y 10 de metro con la C1, C2, C3, C4, C7, C8, C8a y C10 de Renfe. Los andenes de la línea 6 tienen dirección Cuatro Caminos y República Argentina. Existen accesos por Agustín de Bethancourt, Orense, el Paseo de la Castellana pares e impares, por el centro comercial del Corte Inglés; además de diversos accesos a través de las entradas de cercanías.

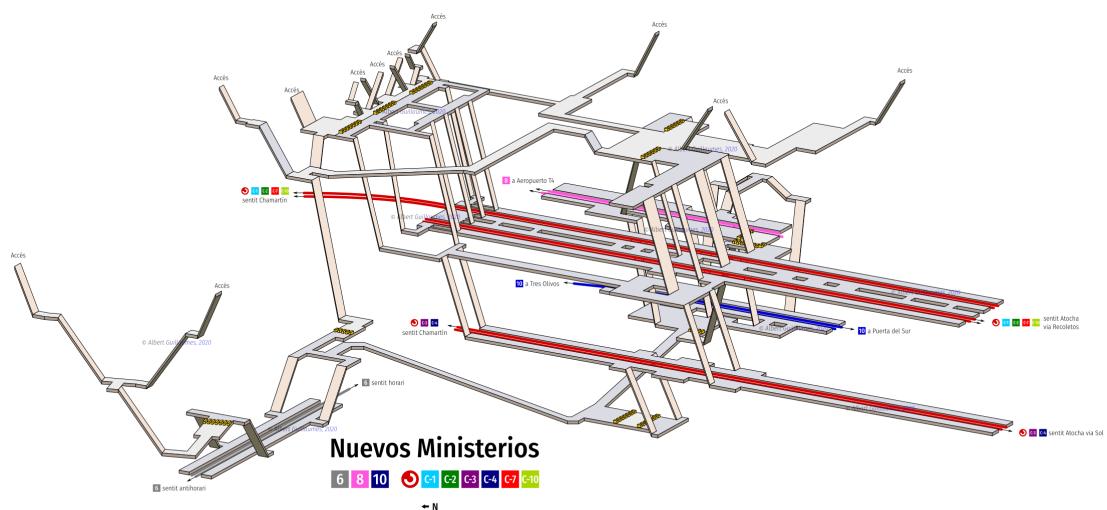


Figura C.18: Representación de la estación de Nuevos Ministerios. Fuente: albert-quillaumes.

- Cuatro Caminos: abierta al público el 17 de octubre de 1919 y con diferentes ampliaciones a lo largo de los años, esta estación de la Zona A del distrito Chamberí/Tetuán se extiende bajo la glorieta de Cuatro Caminos. En ella confluyen las líneas 1 y 2 de metro, además de la 6. Esta última con dos andenes laterales, dirección, Guzmán el Bueno y Nuevos Ministerios.

Al tratarse de una estación muy concurrida, se han construido un total de seis accesos: Reina Victoria (pares e impares), Santa Engracia, Bravo Murillo, Maudes y un ascensor exterior por la calle Santa Engracia.

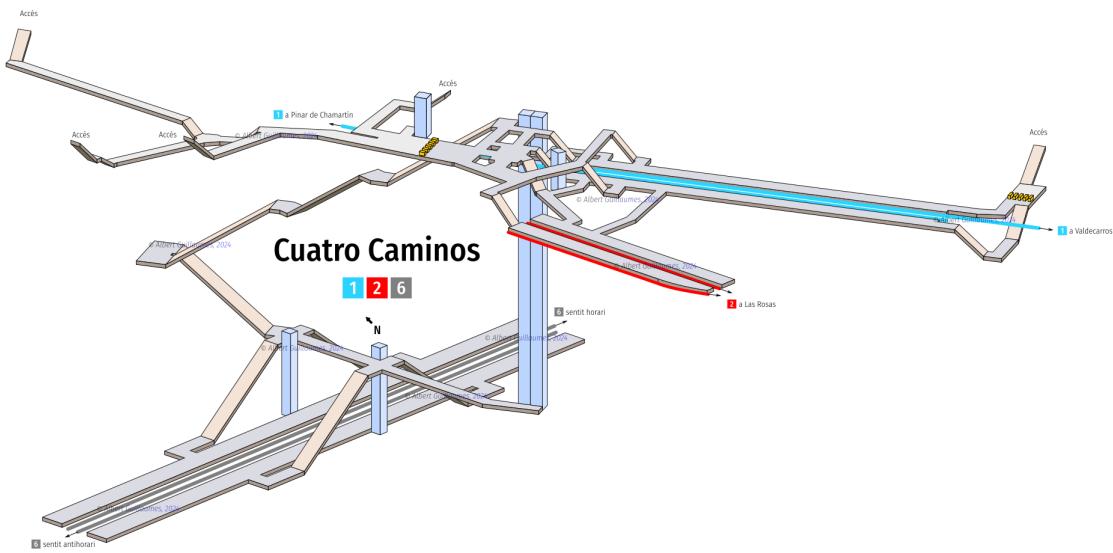


Figura C.19: Representación de la estación de Cuatro Caminos. Fuente: albertguillaumes.

- Guzmán el Bueno: esta estación de la Zona A se encuentra entre los distritos de Chamberí y Moncloa-Aravaca bajo la avenida de Reina Victoria con Guzmán el Bueno. Tuvo su inauguración el 13 de enero de 1987 y en la actualidad confluyen en ella las líneas 6 y 7 de metro, ambas con dos andenes. La primera de ellas con dirección a Cuatro Caminos y la segunda con sentido Vicente Aleixandre. En cuanto los accesos, presenta uno por General Rodrigo, otros dos por la Avenida Reina Victoria (pares e impares, con ascensor) y otro por los Vascos.

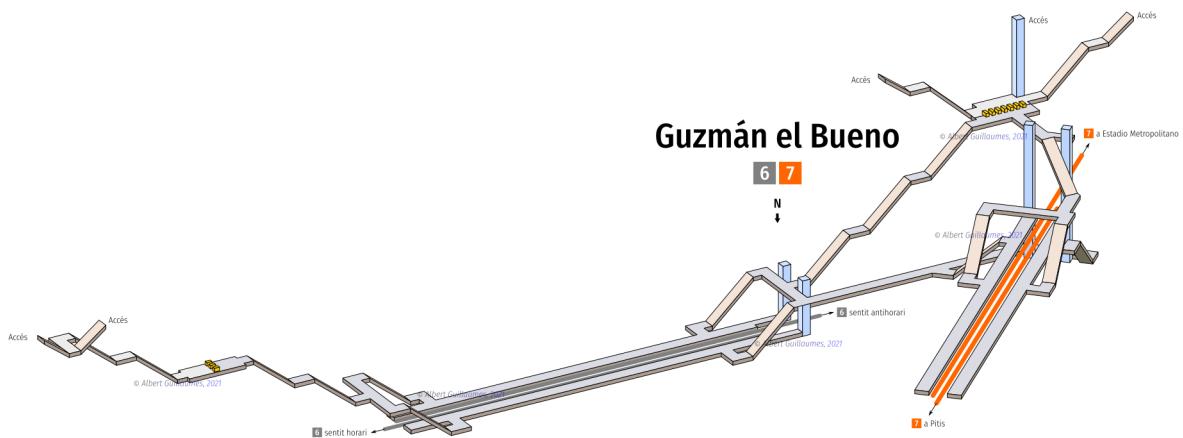


Figura C.20: Representación de la estación de Guzmán el Bueno. Fuente: albertguillaumes.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- Vicente Aleixandre: abierta al público el 13 de enero de 1987, esta estación de la Zona A se encuentra bajo la avenida de Gregorio del Amo con Juan XXIII y pertenece a los distritos de Chamberí y Moncloa-Aravaca. Cuenta con una dirección hacia Guzmán el Bueno y otra a Ciudad Universitaria. Esta parada cuenta con tan solo dos accesos, uno por Gregorio del Amo y otro por Juan XXIII.

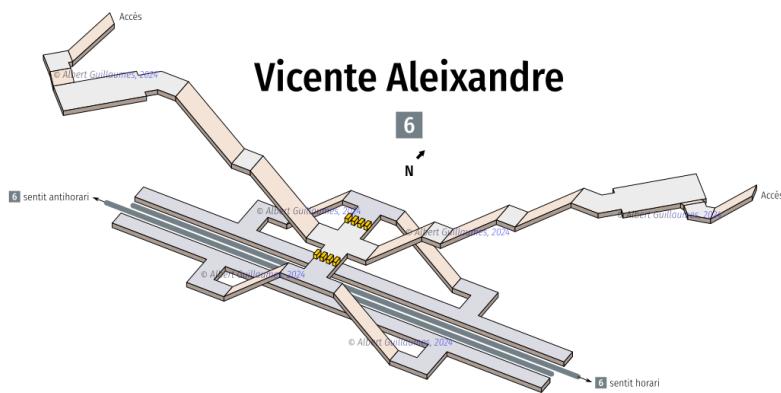


Figura C.21: Representación de la estación de Vicente Aleixandre. Fuente: albertguillaumes.

- Ciudad Universitaria: en el distrito Moncloa-Aravaca bajo la avenida Complutense, esta estación de la Zona A fue inaugurada el 13 de enero de 1987, de manera similar a estaciones mencionadas anteriormente. Cuenta con un andén en dirección Vicente Aleixandre y otro Moncloa se pueden encontrar accesos por la avenida Complutense (con ascensor) y por Facultades.

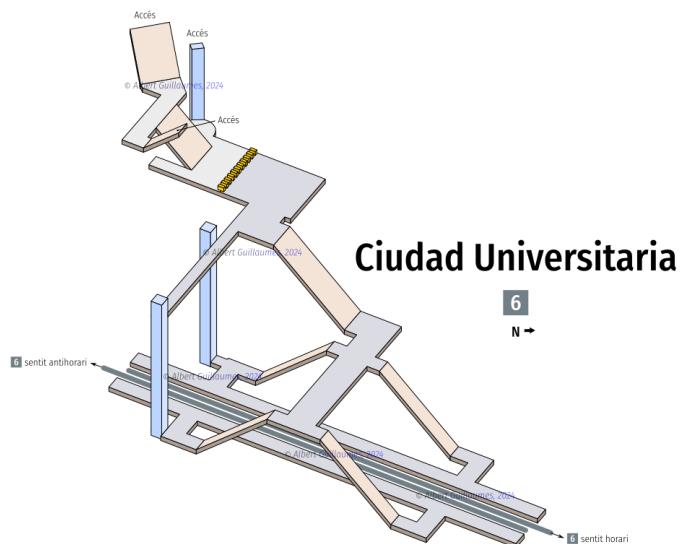


Figura C.22: Representación de la estación de Ciudad Universitaria. Fuente: albertguillaumes.

- Moncloa: se trata de otro de los intercambiadores importantes dentro de la red de transportes de la Comunidad de Madrid y que se localiza en la Zona A, en el distrito Moncloa-Aravaca/Chamberí. Esta estación que se extiende bajo la calle Princesa y la plaza de la Moncloa sirve de interconexión entre las líneas 3 y 6 de metro y autobuses urbanos e interurbanos.

La línea 6 cuenta con dos andenes dirección Argüelles y Ciudad Universitaria. Al tratarse de un intercambiador con un gran número de usuarios, existen multitud de accesos: Arcipreste de Hita, terminal de autobuses-isla 1, Princesa (pares e impares), intercambiador Ejército del Aire, paseo de Moret, Fernández de los Ríos y un acceso por ascensor frente a la Junta Municipal.

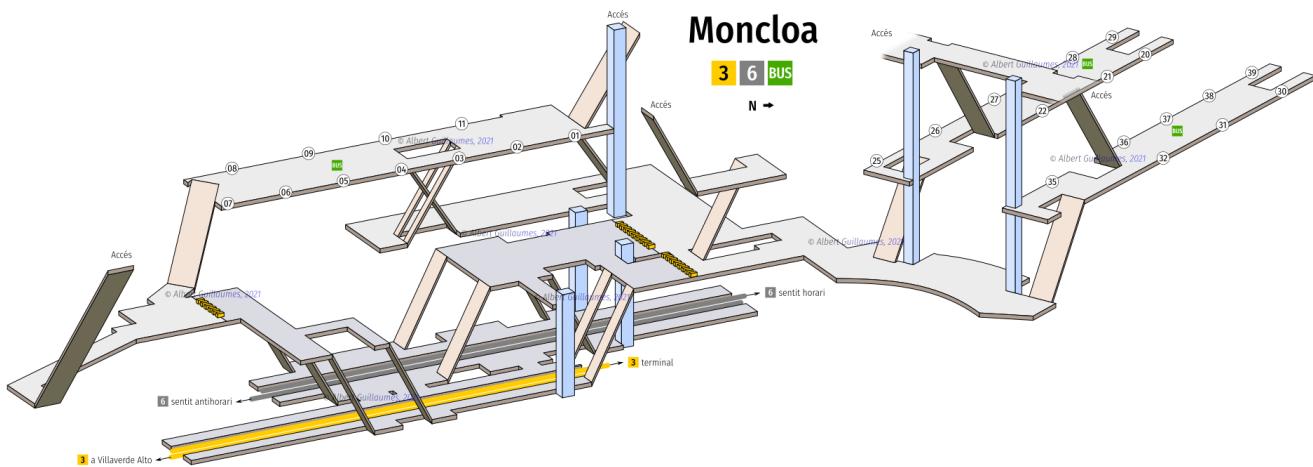


Figura C.23: Representación de la estación de Moncloa. Fuente: albertguillaumes.

- Argüelles: inaugurada el 15 de julio de 1941, esta estación donde confluyen las líneas 3, 4 y 6 de metro, se encuentra en la Zona A, entre los distritos centro, Chamberí y Moncloa-Aravaca. Se extiende bajo el cruce de Princesa con Marqués de Urquijo y Alberto Aguilera.

La línea 4 cuenta con un lateral y uno central, mientras que las líneas 3 y 6 presentan dos andenes laterales. La línea 6 tiene dos vías, una dirección Príncipe Pío y otra destino Moncloa. Los accesos disponibles son los siguientes: Princesa, Alberto Aguilera (con ascensor), Altamirano y Guzmán el Bueno (con ascensor).

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

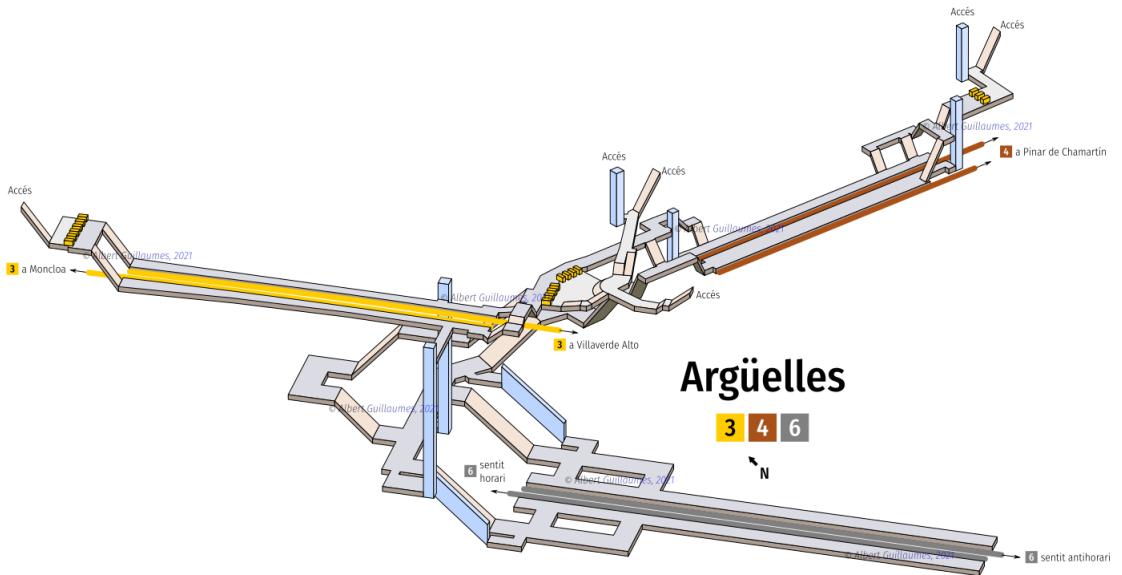


Figura C.24: Representación de la estación de Argüelles. Fuente: albertguillaumes.com.

- Príncipe Pío: localizada en el distrito de Moncloa-Aravaca/Centro, se encuentra delimitada por la glorieta de San Vicente, el paseo de la Florida, la Cuesta de San Vicente y el paseo del Rey. Esta estación, cuya tarifa corresponde a la Zona A, pero que realmente se encuentra en la Zona 0, fue inaugurada en el año 1861 con una construcción muy simple y fue evolucionando a lo largo de las décadas. Se trata de una intermodal que cuenta con conexiones a trenes de autobuses urbanos y de largo recorrido, Cercanías (C1, C7 y C10) y las líneas 6 y R (Ramal, que conecta Príncipe Pío y Ópera), además de la L10. El andén de la línea 6 cuenta con una dirección Argüelles y otro a Puerta del Ángel, en el caso de la L10 son en dirección Plaza de España y Lago. Cuenta con cinco accesos repartidos en la estación Príncipe Pío, todos con accesibilidad.

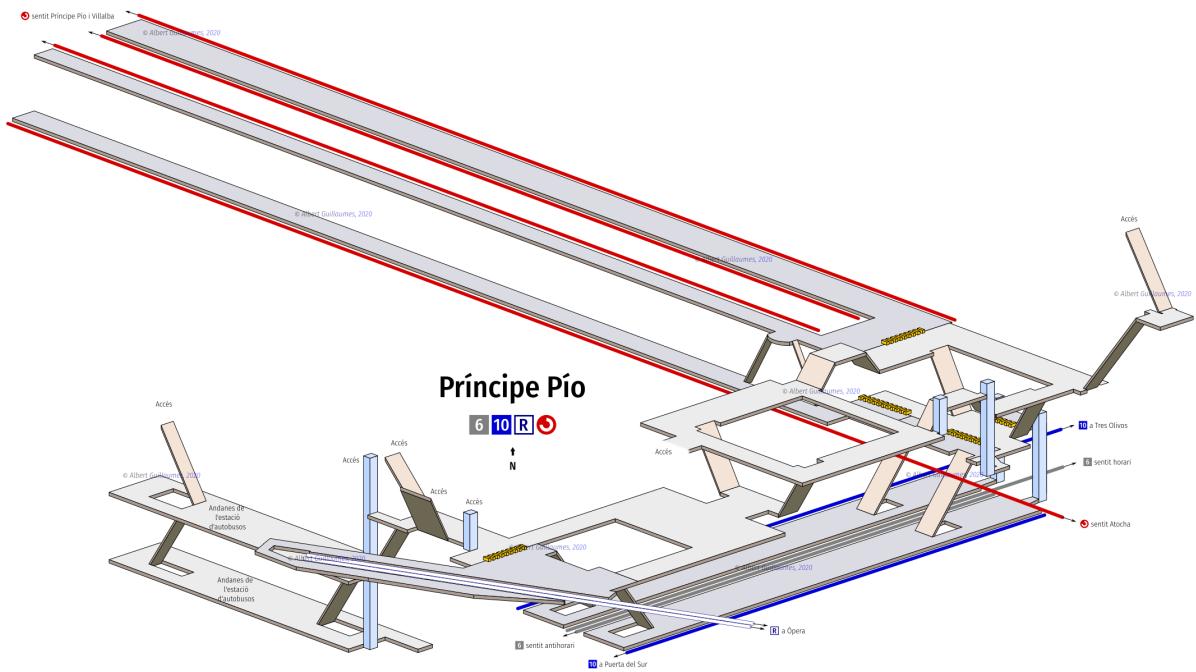


Figura C.25: Representación de la estación de Príncipe Pío. Fuente: albertguillaumes.

- Puerta del Ángel: esta estación situada bajo el paseo de Extremadura con Caramuel en el distrito Latina, fue puesta en marcha el 10 de mayo de 1995 y por ella solo circula la línea 6 de metro. Los andenes son dirección, Príncipe Pío y alto de Extremadura y tiene accesos por plaza Santa Cristina y Caramuel.

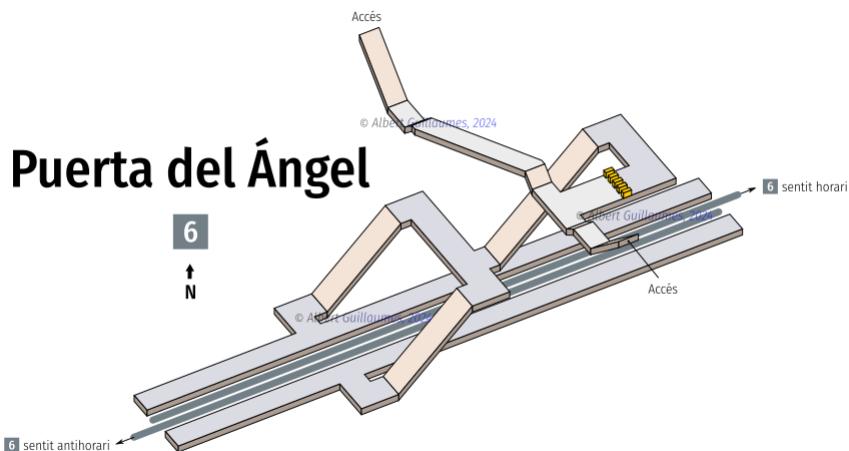


Figura C.26: Representación de la estación de Puerta del Ángel. Fuente: albertguillaumes.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- Alto de Extremadura: estación de la Zona A, en el distrito Latina bajo el Paseo de Extremadura con Navas del Rey. Se trata de un espacio inaugurado el 10 de mayo de 1995, al igual que el área de Puerta del Ángel. La línea presenta dos andenes uno dirección Puerta del Ángel y otro dirección Lucero. A día de hoy, presenta dos accesos, uno por Plaza alto Extremadura y otro por Francisco Brizuela.

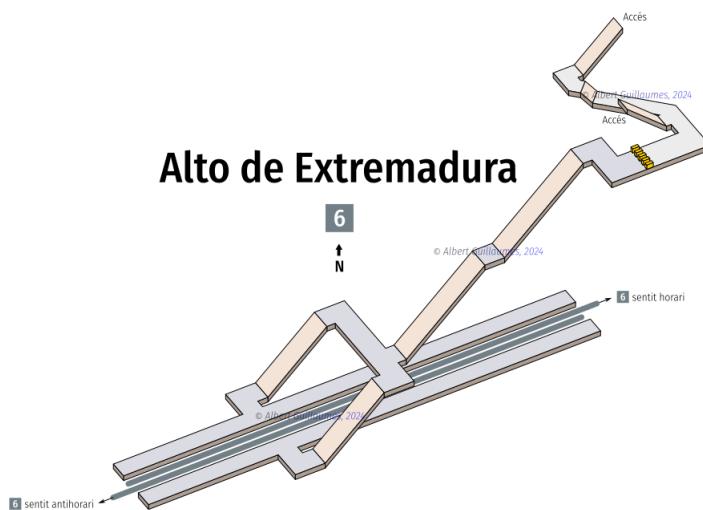


Figura C.27: Representación de la estación de Alto de Extremadura. Fuente: albertguillaumes.

- Lucero: inaugurada al público el 10 de mayo de 1995, esta estación de la Zona A del distrito latina construida, bajo el camino de las Higueras con Sepúlveda, tiene andenes, dirección Alto de Extremadura y Laguna, con lo que se cierra el recorrido circular. Presenta accesos por Cebreros (con ascensor) e Higueras.

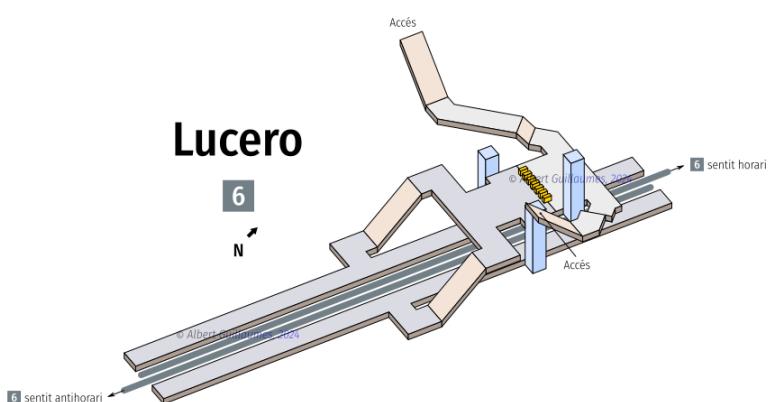


Figura C.28: Representación de la estación de Lucero. Fuente: albertguillaumes.

Las representaciones gráficas de las estaciones han sido tomadas de la web de Albert Guillaumes [23]

C.2. Línea 10

Las estaciones que componen la L10 son: Hospital Infanta, Sofía, Reyes Católicos, Baunatal, Manuel de Falla, Marqués de la Valdavia, La Moraleja, La Granja, Ronda de la Comunicación, Las Tablas, Montecarmelo, Tres Olivos, Fuencarral, Begoña, Chamartín, Plaza de Castilla, Cuzco, Santiago Bernabéu, Nuevos Ministerios, Gregorio Marañón, Alonso Martínez, Tribunal, Plaza de España, Príncipe Pío, Lago, Batán, Casa de Campo, Colonia Jardín, Aviación Española, Cuatro Vientos, Joaquín Vilumbrales y Puertas del Sur [20]:

Cabe destacar, que al igual que en el caso de la línea 6, toda la información ha sido obtenida de la web de Metro de Madrid [24]. A continuación se va a desarrollar la descripción completa de todas y cada una de las paradas:

- Hospital Infanta Sofía: situada en el distrito de San Sebastián de los Reyes, en la convergencia de las calles Paseo de Europa y María Moliner. Esta estación se inauguró el 26 de abril de 2007 y se encuentra en la Zona B1. Cuenta con dos andenes laterales con dos vías de metro, ambas hacia Reyes Católicos ya que es el final de la línea. Presenta dos accesos, uno en Paseo de Europa y otro por Poeta Rafael Morales, el primero con acceso por ascensor.

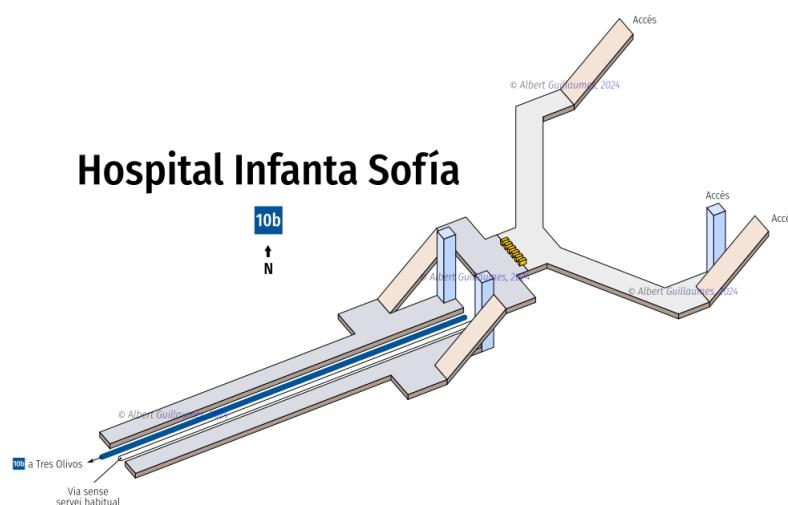


Figura C.29: Representación de la estación de Hospital Infanta Sofía. Fuente: [albertguillaumes](#).

- Reyes Católicos: esta estación se encuentra en el municipio de San Sebastián de los Reyes en el distrito Casco Antiguo. Inaugurada el 26 de abril de 2007, se ubica en la Zona B1 en la intersección de Avenida de la Plaza de

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

Toros con Estafeta. Tiene dos andenes y dos vías de metro, una hacia Baunatal y la otra hacia Hospital Infanta Sofía. Cuenta con una entrada por la avenida de la Plaza de Toros y está adaptada para personas con movilidad reducida al contar con ascensor.

Reyes Católicos

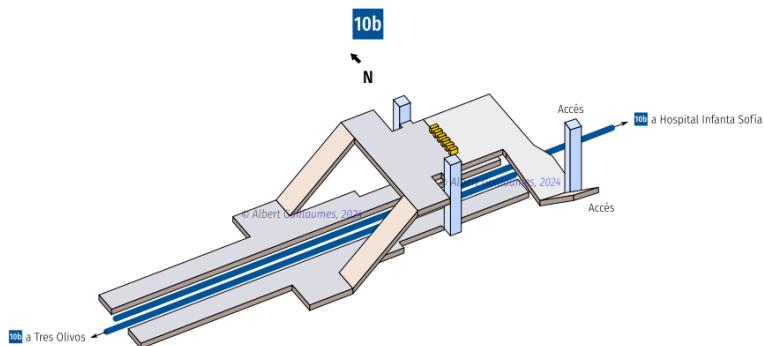


Figura C.30: Representación de la estación de Reyes Católicos. Fuente: albertguillau...mes.

- **Baunatal:** se encuentra en el distrito de Ensanche, en el municipio de San Sebastián de los Reyes en la intersección de la avenida de Baunatal y Lomas del Rey. Inaugurada el 26 de abril de 2007, tiene dos andenes y dos vías de metro que van hacia las estaciones de reyes Católicos y Manuel de Falla. Con una entrada única desde la avenida de Lomas del Rey (con ascensor). Destaca por ser también intersección con varias líneas de autobús.

Baunatal

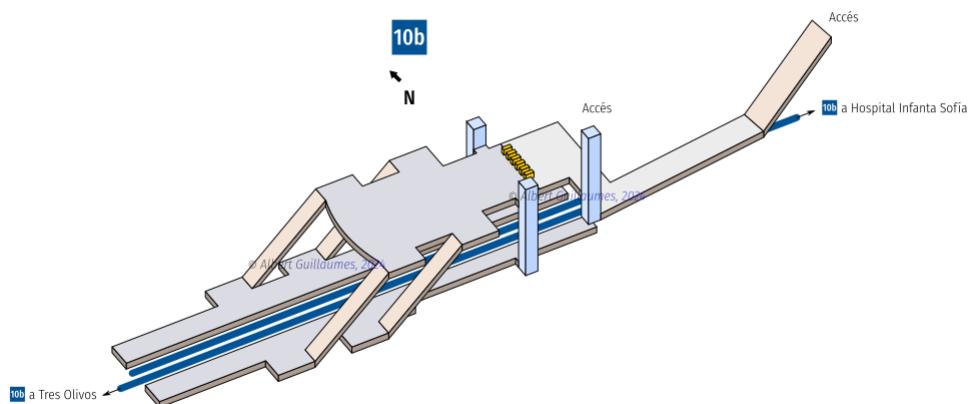


Figura C.31: Representación de la estación de Baunatal. Fuente: albertguillau...mes.

- Manuel de Falla: es una estación ubicada en la Zona B1 en el municipio de Alcobendas (distrito Norte), en la confluencia de las avenidas de Constitución y Manuel de Falla. Fue inaugurada el 26 de abril de 2007. Conformada por dos andenes y dos vías de metro, una va hacia Baunatal y otra hacia Marqués de la Valdavia. En lo que respecta a los accesos, existe uno único, por la avenida de Manuel de Falla y cuenta con ascensor.

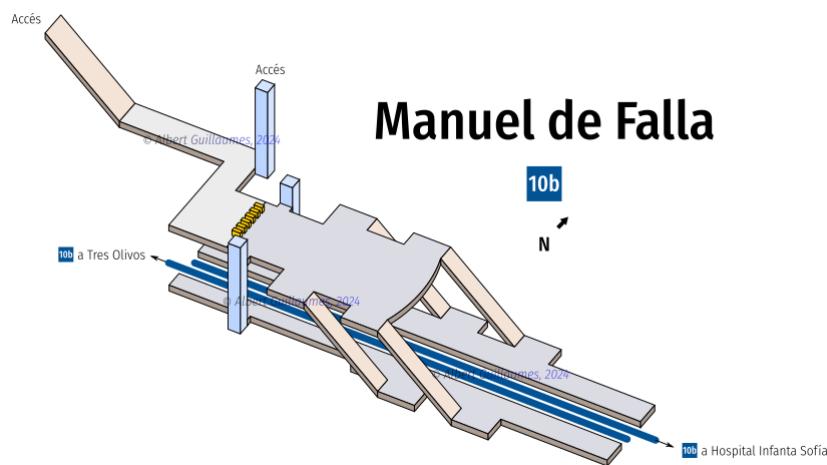


Figura C.32: Representación de la estación de *Manuel de Falla*. Fuente: *albertguillaumes*.

- Marqués de la Valdavia: está en Alcobendas, en la intersección de la Avenida de España y la Calle Marqués de la Valdavia. Inaugurada el 26 de abril de 2007, es parte de la Zona B1 y tiene 2 andenes. Dispone de dos vías, una hacia La Moraleja y otra hacia La Granja. La estación tiene 2 entradas, una por la Avenida de España y otra por la calle Marqués de la Valdavia.

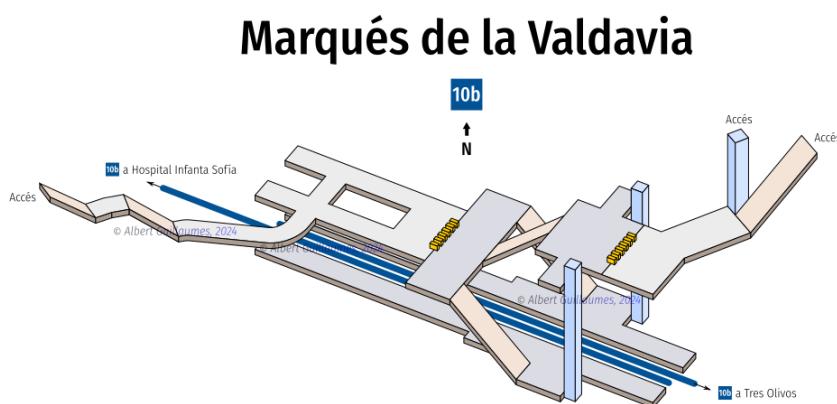


Figura C.33: Representación de la estación de *Marqués de la Valdavia*. Fuente: *albertguillaumes*.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- La Moraleja: está ubicada en el distrito financiero de Alcobendas, bajo la avenida de la Ermita con la avenida de Bruselas. Se abrió al público el día 26 de abril del año 2007, al igual que las estaciones anteriores, y es una de las localizadas en la Zona B1. Cuenta con 2 andenes con trenes que circulan hacia las estaciones de Marqués de Valdavia y La Granja. Tiene un acceso por la avenida de Bruselas, adaptado con ascensor.

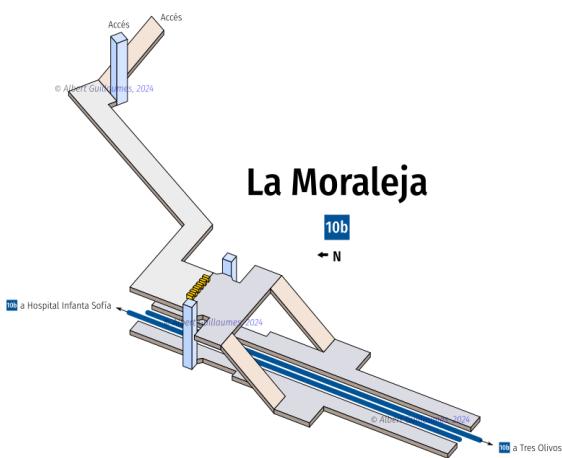


Figura C.34: Representación de la estación de *La Moraleja*. Fuente: *albertguillau-mes*.

- La Granja: situada en el distrito de Alcobendas, en la intersección de las calles de La Granja y Marqués de la Valdavia. Fue inaugurada el 26 de abril de 2007 y cuenta con 2 andenes y dos vías de metro que van en dirección a las estaciones de La Moraleja y Ronda de la Comunicación. Esta estación tiene un acceso equipado con ascensor por la calle Sepúlveda. Es la última parada de la línea, hasta Joaquín Vilumbrales, que se encuentra en la Zona B1.

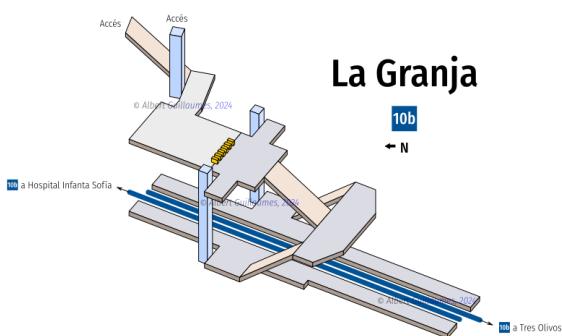


Figura C.35: Representación de la estación de *La Granja*. Fuente: *albertguillau-mes*.

- Ronda de la Comunicación: se ubica en el distrito de Fuencarral-El Pardo, bajo la intersección de la Ronda de la Comunicación y Puerta de Platerías. Ya en la Zona A, fue inaugurada el 26 de abril de 2007 y presenta dos andenes uno en dirección a la estación de La Granja y otro a Las Tablas. Posee una entrada, por Maestro Mateo, que cuenta con acceso por ascensor.

Ronda de la Comunicación

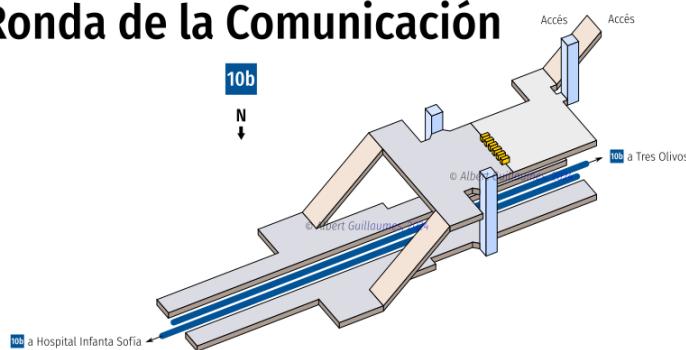


Figura C.36: Representación de la estación de Ronda de la Comunicación. Fuente: [albertguillaumes](#).

- Las Tablas: situada en el barrio de Las Tablas, en el distrito Fuencarral-El Pardo, bajo la intersección de las calles de Palas de Rey y San Juan de Ortega. Inaugurada el 26 de abril de 2007, está en la Zona A y cuenta con 2 andenes uno con destino a la estación de Ronda de Comunicación y la otra a Montecarmelo. Existe, además, interconexión con la línea uno de Metro Ligero. Posee un acceso en la calle Palas de Rey, adaptado para personas con movilidad reducida.

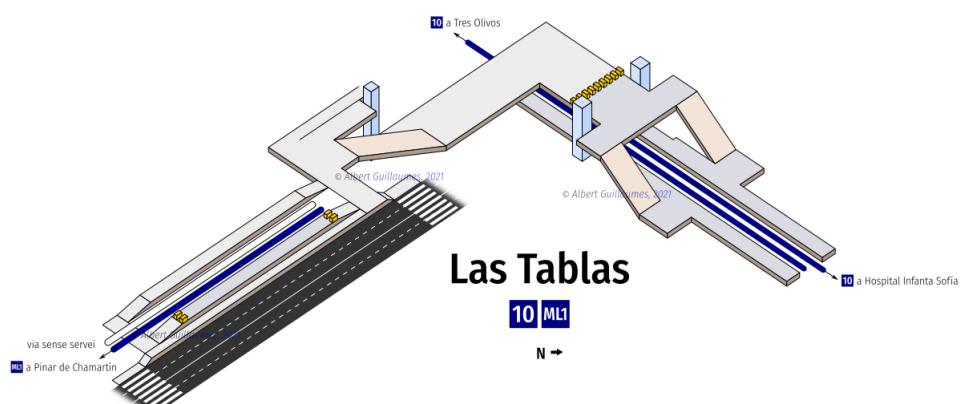


Figura C.37: Representación de la estación de Las Tablas. Fuente: [albertguillaumes](#).

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- Montecarmelo: esta estación está localizada en el distrito de Fuencarral-El Pardo, donde las calles Monasterio de Silos y Monasterio Samos se cruzan. Se inauguró el 26 de abril de 2007 y proporciona servicio de metro a la Zona A. Cuenta con 2 andenes y dos vías de metro que se dirigen hacia las estaciones de Las Tablas y Tres Olivos. Su única entrada se encuentra en la avenida del Monasterio de Silos con acceso para personas con movilidad reducida.

Montecarmelo

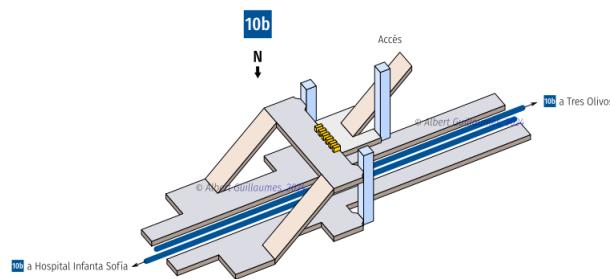


Figura C.38: Representación de la estación de Montecarmelo. Fuente: albertguillaumes.

- Tres Olivos: situada en el barrio homónimo en el distrito Fuencarral-El Pardo, está ubicada en la calle Caballero de la Triste Figura con campos de Calatrava. Inaugurada el 26 de abril de 2007, consta de dos andenes, uno lateral y uno central. El lateral cuenta con una sola dirección hacia la estación de Montecarmelo, dirección Hospital Infanta Sofía, al igual que la central que solo va dirección Puerta del Sur, a la parada de Fuencarral. Cabe destacar que es necesario hacer un transbordo de tren, ya que existe un corte en ambos andenes. Además, tiene una salida por Retablo de Melisendra.

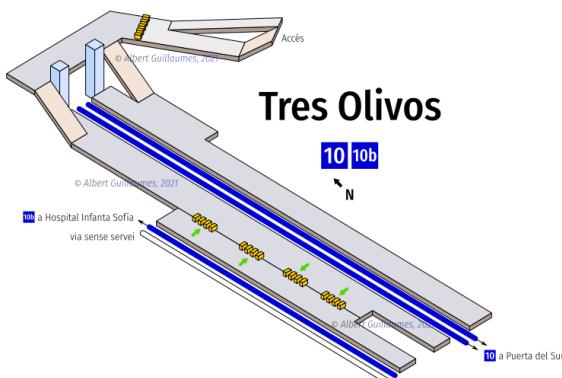


Figura C.39: Representación de la estación de Tres Olivos. Fuente: albertguillaumes.

- Fuencarral: ubicada en el distrito del mismo nombre, en el barrio de Valverde, fue inaugurada el 10 de junio de 1982 como parte de la antigua línea 8 y pasó a formar parte de la 10 en el año 1998, el 22 de enero. Cuenta con dos andenes y dos vías de metro, una hacia Tres Olivos y otra hacia Begoña. Se accede por el barrio de Santa Ana.

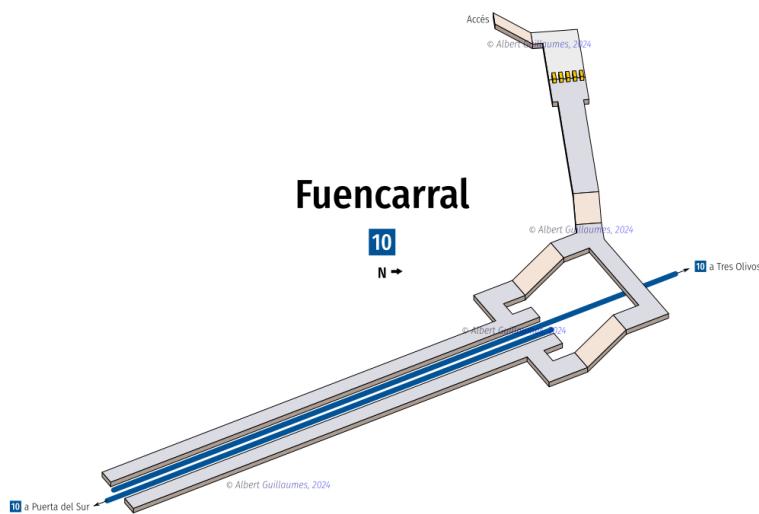


Figura C.40: Representación de la estación de Fuencarral. Fuente: [albertguillaumes](#).

- Begoña: situada entre los distritos de Fuencarral-El Pardo y Chamartín, en la intersección de las calles de San Modesto, Pedro Rico, la Castellana, y Arzobispo Morcillo. Inaugurada el 10 de junio de 1982, cuenta con dos andenes y dos vías de metro que se dirigen hacia las estaciones de Fuencarral y Chamartín. Tiene dos entradas, una por Ciudad Sanitaria, La Paz y otra por San Modesto, con un acceso por ascensor en construcción.

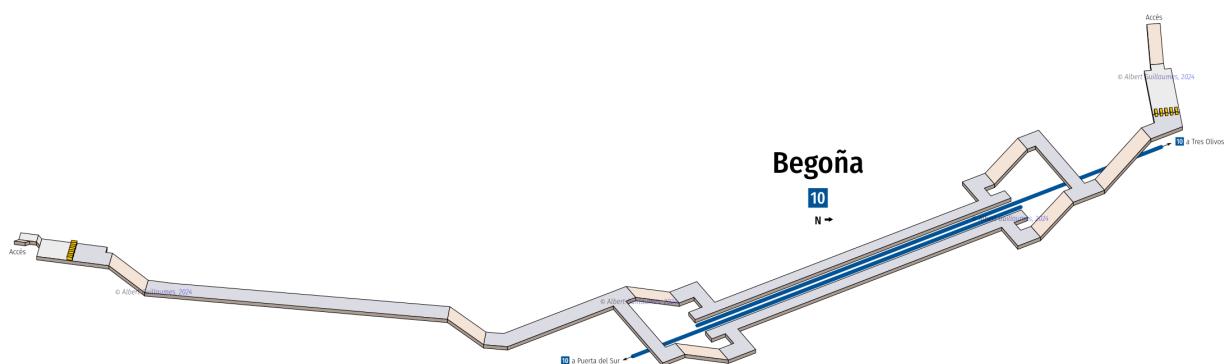


Figura C.41: Representación de la estación de Begoña. Fuente: [albertguillaumes](#).

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- Chamartín: localizada en el distrito de Chamartín, se encuentra debajo del complejo de estaciones de Chamartín, proporcionando conexiones a la L1 de metro, además de la L10, a los trenes de Cercanías y a autobuses interurbanos. Inaugurada en 10 de junio de 1982, cuenta con dos andenes uno hacia la estación de Begoña y otra hacia la de Plaza de Castilla. En cuanto a los accesos, se puede entrar por Chamartín (con ascensor), por el corredor de acceso a las vías de Cercanías y por el vestíbulo de Renfe, a través de Agustín de Foxá y Pío XII.

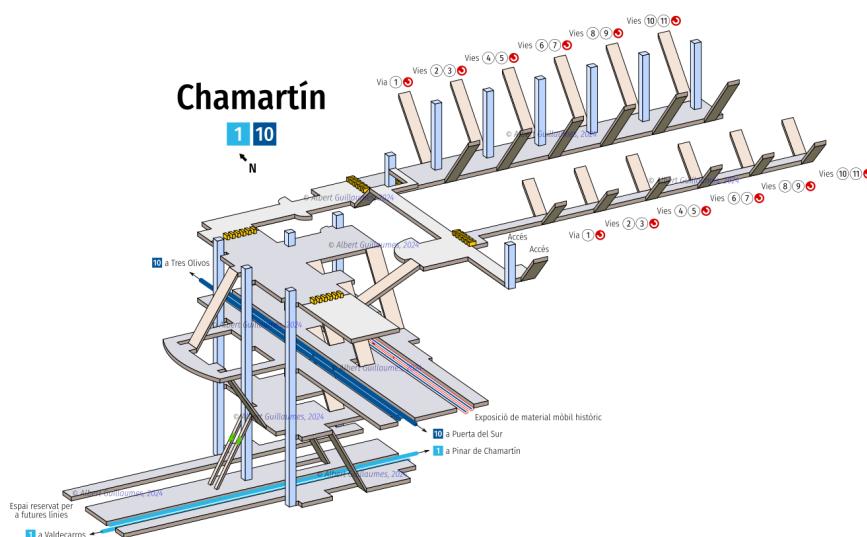


Figura C.42: Representación de la estación de Chamartín. Fuente: albertguillau-mes.

- Plaza de Castilla: ubicada entre los distritos de Chamartín y Tetuán en la Zona A, es un importante núcleo de transporte en el norte de Madrid proporcionando conexiones a las líneas 10, 9 y 1 de metro y a autobuses interurbanos. Inaugurada el 4 de febrero de 1961, esta parada formaba parte de la cabecera de la L1 y ha ido evolucionando a lo largo de los años. Cuenta con seis andenes y, en el caso de la L10, los vagones de metro circulan tanto a la estación de Chamartín como a la de Cuzco. La estación tiene múltiples entradas: Castellana por la calle de Plaza de castilla (con ascensor), Castellana (pares e impares, con ascensor), intercambiador superficie, intercambiador subterráneo y Bravo Murillo.

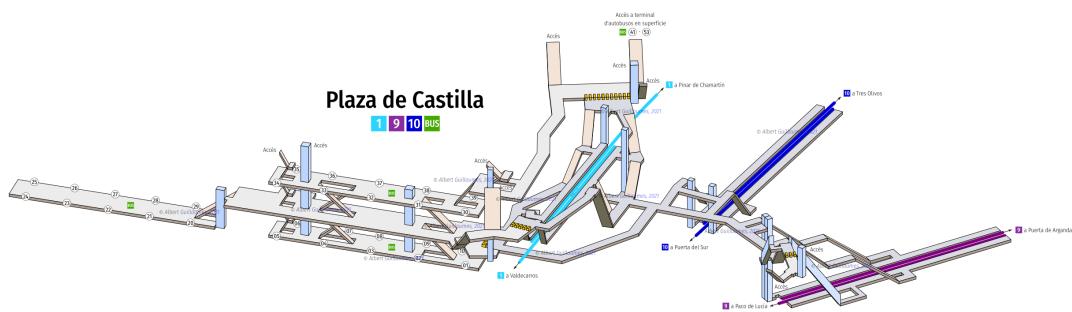


Figura C.43: Representación de la estación de Plaza de Castilla. Fuente: albertguillaumes.

- Cuzco: se encuentra en el distrito de Chamartín/Tetuán, en la intersección de las calles del Paseo de la Castellana y la avenida de Alberto Alcocer, en la Zona A. Fue inaugurada el 10 de junio de 1982, pero pasó a formar parte de la L10 en el año 1998. Cuenta con 2 andenes laterales y dos vías de metro que circulan en dirección a las estaciones de Plaza de Castilla y Santiago Bernabéu. Esta estación tiene dos accesos en el Paseo de la Castellana, por los pares y los impares.

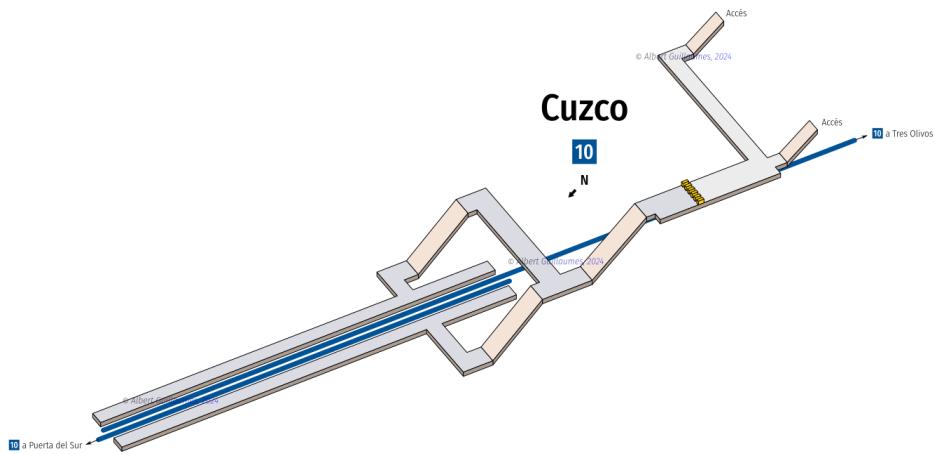


Figura C.44: Representación de la estación de Cuzco. Fuente: albertguillaumes.

- Santiago Bernabéu: ubicada en el distrito de Chamartín/Tetuán, precisamente en la intersección del Paseo de la Castellana y la calle General Perón. Esta estación fue inaugurada el 10 de junio de 1982 y pertenece a la Zona A. Además, cuenta con dos andenes en sentido a las estaciones de Cuzco y Nuevos Ministerios. Tiene cuatro accesos, tres en el Paseo de la Castellana y otro en la Plaza de Lima.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

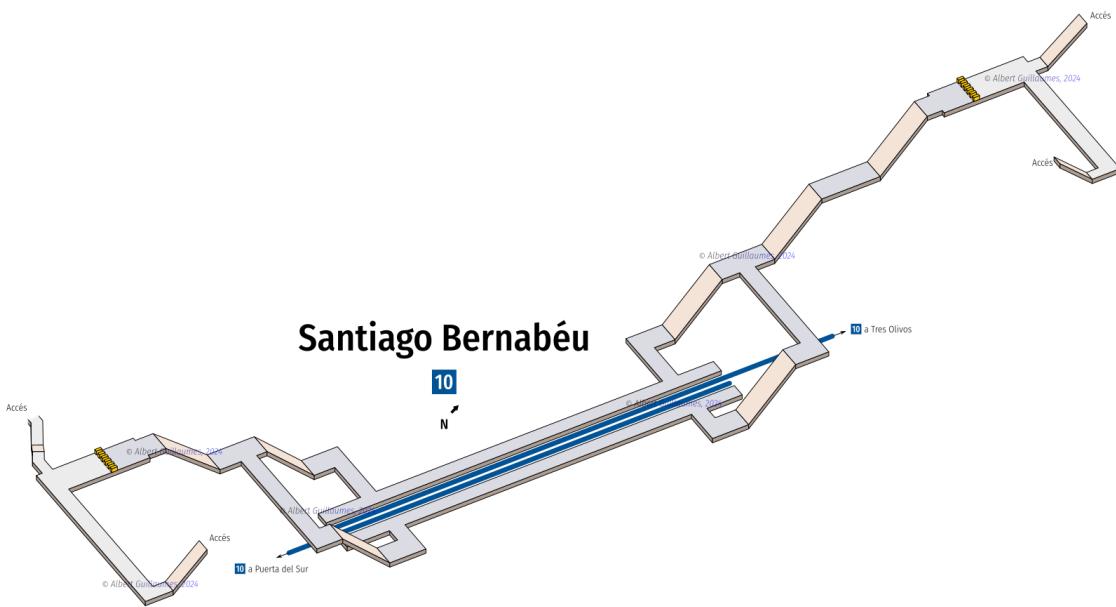


Figura C.45: Representación de la estación de Santiago Bernabéu. Fuente: albert-guillaumes.

- Nuevos Ministerios: [la información de este intercambiador es similar a la encontrada en el apartado de la línea 6 del Metro de Madrid].
- Gregorio Marañón: situada en el distrito de Chamberí/Chamartín/Salamanca, esta estación fue inaugurada el 27 de octubre de 1998 y sirve de conexión de la L10 con la L7. Posee dos direcciones que se dirigen a las estaciones de Nuevos Ministerios y Alonso Martínez. Cuenta con dos accesos, uno en Miguel Ángel y otro en José Abascal, este último con ascensor.

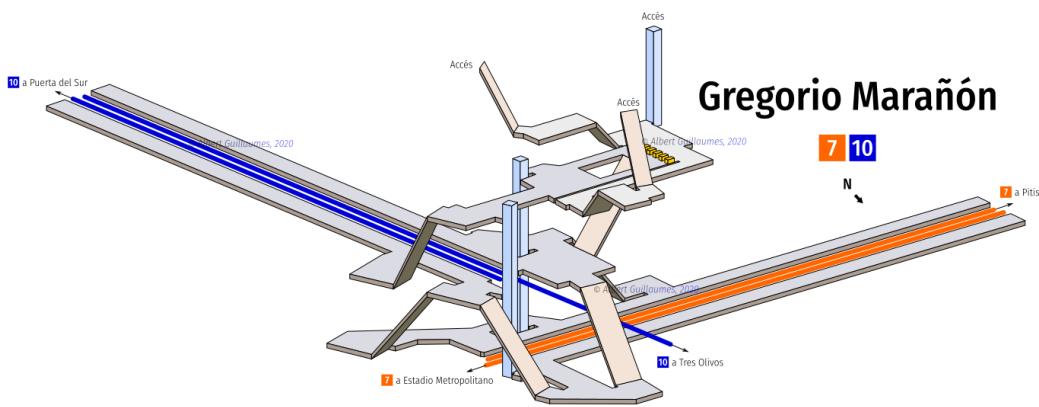


Figura C.46: Representación de la estación de Gregorio Marañón. Fuente: albert-guillaumes.

- Alonso Martínez: se encuentra en el distrito de Chamberí/Centro y fue inaugurada por primera vez con la L4 en 1944, aunque no fue hasta el año 1981 que se abrió al público para la línea 10. Es parte de la Zona A y está conectada con las líneas 4 y 5 de metro.

Cuenta, con dos andenes y dos vías de metro que circulan hacia las estaciones de Gregorio Marañón y Tribunal. La estación tiene cuatro accesos, uno en Santa Engracia, otro en Plaza Santa Bárbara, otro en Génova (pares) y un último acceso en Hermanos Álvarez Quintero.

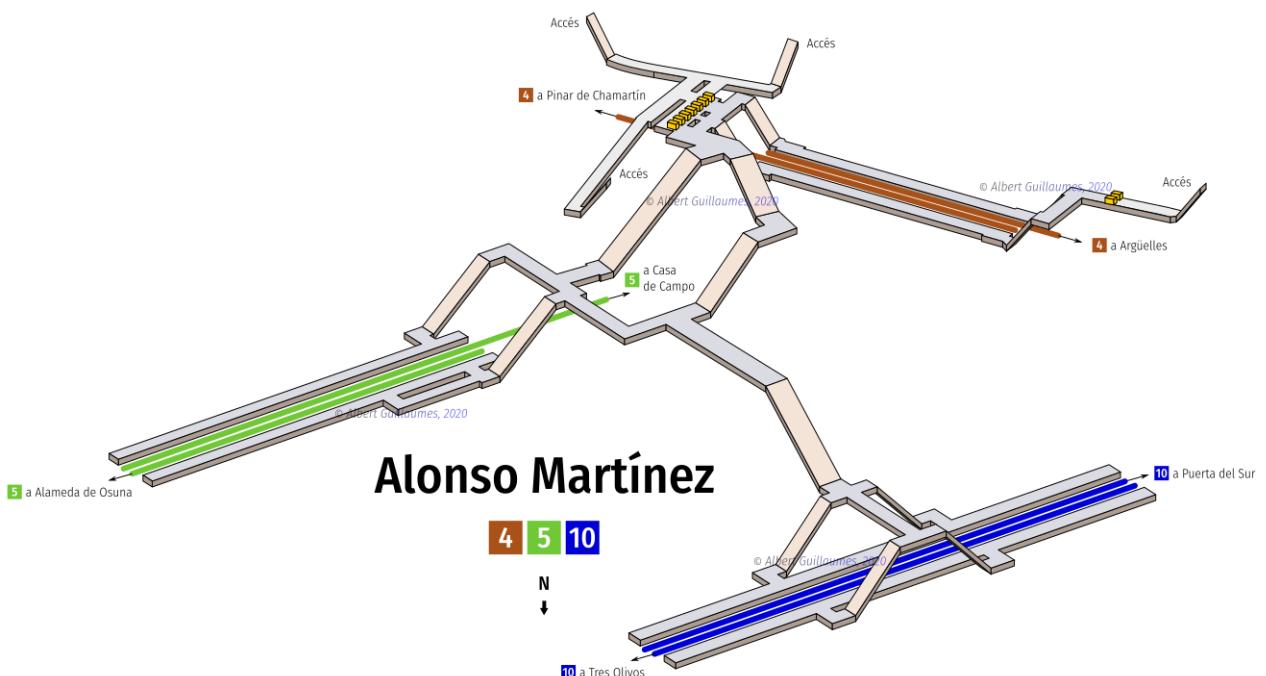


Figura C.47: Representación de la estación de Alonso Martínez. Fuente: albertguillaumes.

- Tribunal: se ubica en el distrito de Centro en la Zona A, bajo la intersección de las calles de Fuencarral y Barceló. Fue inaugurada por Alfonso XIII en 1919, si bien los andenes de la L10 no se abrieron hasta 1981. Sirve de interconexión entre la L1 y L10 y presenta dos andenes y dos vías de metro que circulan en dirección a las estaciones de Alonso Martínez y Plaza de España.

Esta estación tiene tres accesos, uno en la calle de Fuencarral, otro en la calle de Barceló a través de un ascensor y un último por el vestíbulo del Tribunal de Cuentas.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

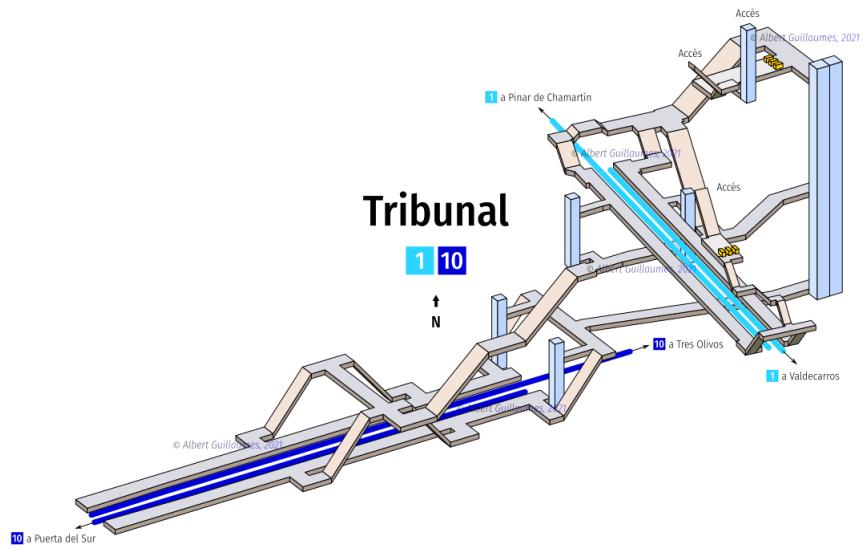


Figura C.48: Representación de la estación de Tribunal. Fuente: albertguillaumes.

- **Plaza de España:** localizada en el distrito de Centro/Moncloa-Aravaca, la parada fue inaugurada en 1925 con la L2 y la correspondencia a la L10 en el año 1961. Cuenta con tres andenes dada su confluencia con la línea 3 y dos vías de metro que se dirigen a las estaciones de Tribunal y Príncipe Pío. Cabe destacar que a través de esta estación se puede acceder a la parada de Noviciado de la L2. Además, posee seis accesos: Leganitos, Coliseum, Reyes, Princesa, Plaza de España (con ascensor) y a través de la Plaza del Conde de Toreno (únicamente por medio de ascensor).

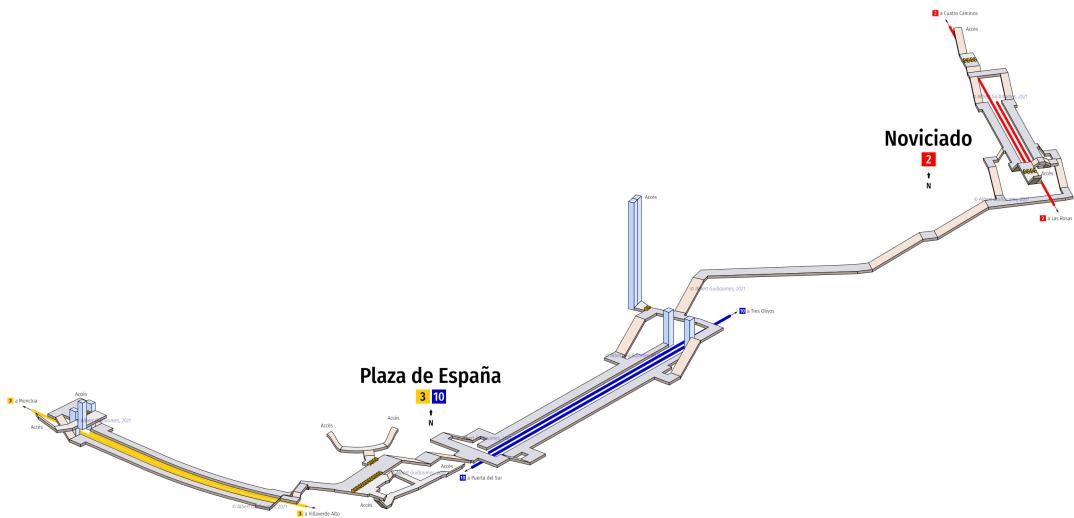


Figura C.49: Representación de la estación de Plaza de España. Fuente: albertguillaumes.

- Príncipe Pío: [la información de este intercambiador es similar a la encontrada en el apartado de la línea 6 del Metro de Madrid].
- Lago: Se encuentra en el distrito de Moncloa-Aravaca, en la intersección de las calles de Paseo de la Puerta del Ángel con Ronda del Lago. Inaugurada el 4 de febrero de 1961, es una estación de la Zona A. Cuenta con 2 andenes laterales y dos vías de metro que circulan hacia las estaciones de Príncipe Pío y Batán. Hay una única entrada en El Lago, en la piscina municipal de Casa de Campo.

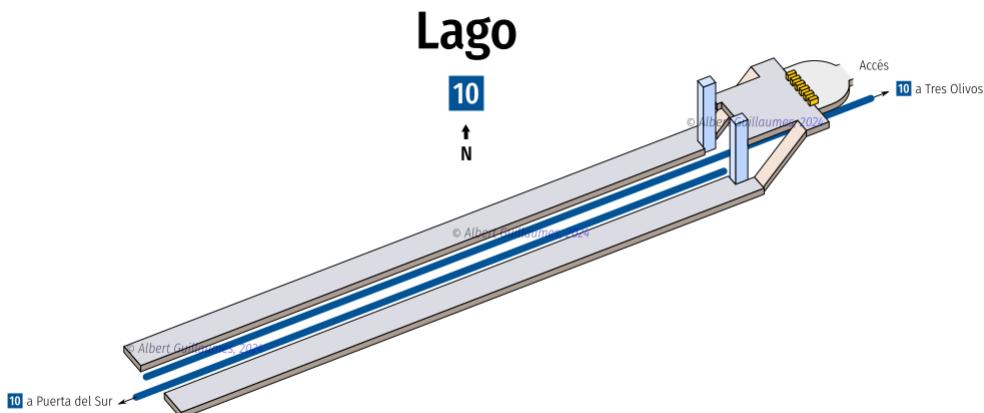


Figura C.50: Representación de la estación de Lago. Fuente: albertguillaumes.

- Batán: ubicada entre los distritos de Moncloa-Aravaca y Latina, en la intersección de las calles la Venta del Batán, Paseo de la Venta, Villamanín y Camino de Campamento. Inaugurada el 4 de febrero de 1961, esta estación posee 2 andenes con destino a Lago y Casa de Campo. Además, tiene dos accesos, uno en la calle de Venta del Batán y otro por Villamanín.

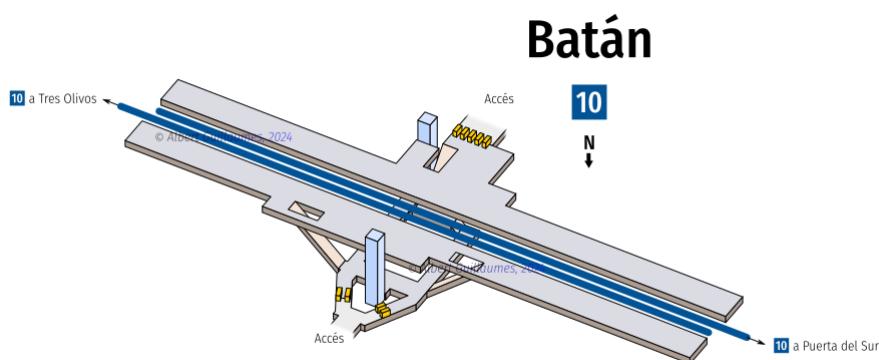


Figura C.51: Representación de la estación de Batán. Fuente: albertguillaumes.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- Casa de Campo: situada en el distrito de Moncloa-Aravaca/Latina, bajo la intersección de Puerta del Batán y Paseo de la Venta, esta parada se inauguró el 22 de octubre de 2002 y pertenece a la Zona A. La estación sirve de interconexión entre las líneas 5 y 10 de metro y cuenta con dos andenes centrales que, en el caso de la L10, van en dirección a las estaciones de Batán y Colonia Jardín. Tiene dos accesos, uno en Camino de Campamento y otro a través de ascensor por la carretera del Zoo.

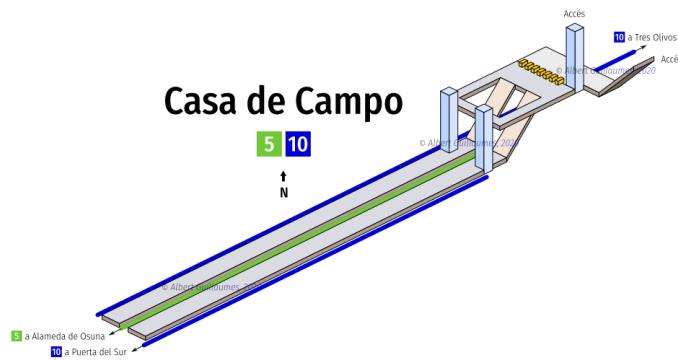


Figura C.52: Representación de la estación de Casa de Campo. Fuente: albertguillaumes.

- Colonia Jardín: esta parada está localizada en el distrito de Latina, en el barrio de Campamento, más específicamente bajo la carretera de Carabanchel a Aravaca. Inaugurada el 22 de octubre de 2002, sirve de punto de conexión entre la línea 10 de metro y las líneas 2 y 3 de Metro Ligero. Cuenta con 6 andenes que en el caso de la L10 va en dirección a Casa de Campo y Aviación Española. Los accesos disponibles son tres, uno en la calle de Sedano, otro en Arenas de San Pedro y un último acceso por ascensor a través de la carretera de Carabanchel a Aravaca número 56.

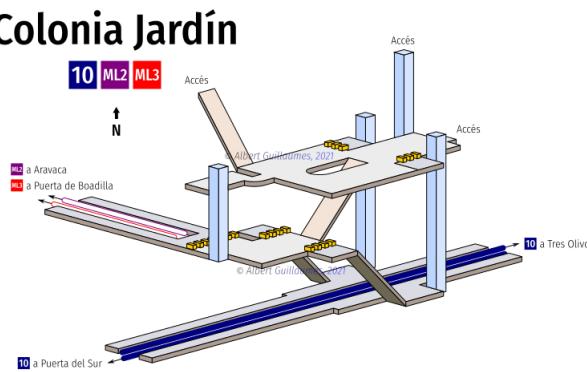


Figura C.53: Representación de la estación de Colonia Jardín. Fuente: albertguillaumes.

- Aviación Española: se encuentra en el distrito de Latina, en la intersección de Paseo de Extremadura con Fuente de Lima. Esta parada fue inaugurada el 22 de diciembre de 2006 y es parte de la Zona A, además, cuenta con 2 andenes laterales y dos vías de metro que se dirigen a las estaciones de Colonia Jardín y Cuatro Vientos. Tiene un único acceso por Fuente de Lima que cuenta con ascensor.

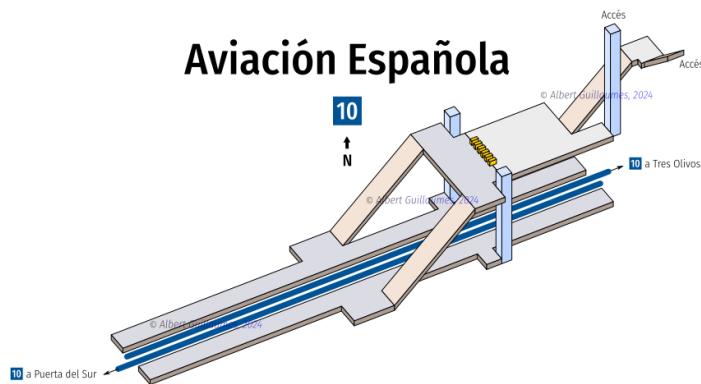


Figura C.54: Representación de la estación de Aviación Española. Fuente: albertguillaumes.

- Cuatro Vientos: ubicada en el distrito de Latina, la estación se localiza en la intersección de las calles Paseo de Extremadura con Lanceros. Su inauguración fue el día 29 de octubre de 1976, como estación de Cercanías y el 11 de abril de 2003 como parada del Metro de Madrid. Funciona, por lo tanto, como conexión entre la L10 y la C5. Cuenta con dos andenes con destino Aviación Española y Joaquín Vilumbrales. Tiene tres accesos, dos que cuentan con ascensor en el Paseo de Extremadura y el Paseo de los Úsares y otro a través de la Renfe.

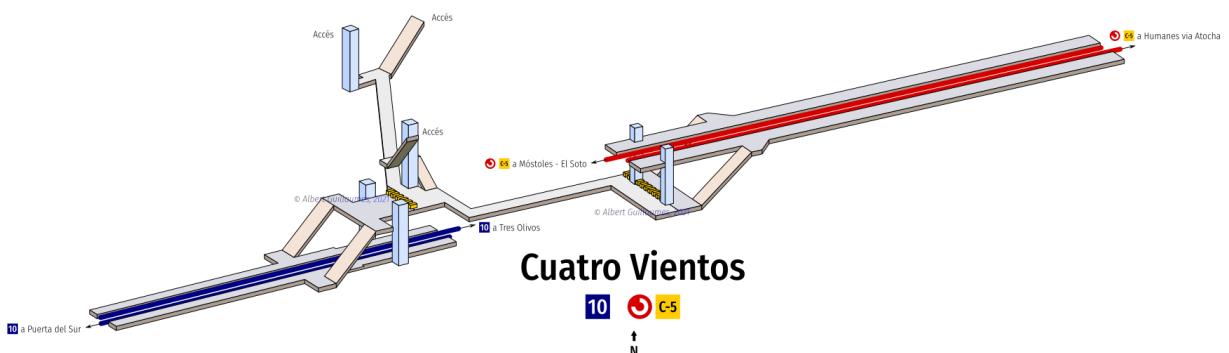


Figura C.55: Representación de la estación de Cuatro Vientos. Fuente: albertguillaumes.

Capítulo C. Anexo III: descripción completa de las estaciones

- Joaquín Vilumbrales: se ubica en el distrito Norte, debajo de la intersección de la calle Carballino con la avenida de la Libertad. Fue inaugurada el 11 de abril de 2003 y es una estación de la Zona B1. Cuenta con un andén central y dos vías de metro que circulan en dirección a las estaciones de Cuatro Vientos y Puerta del Sur, además de dos accesos por la avenida de la Libertad (pares e impares, este último con ascensor).

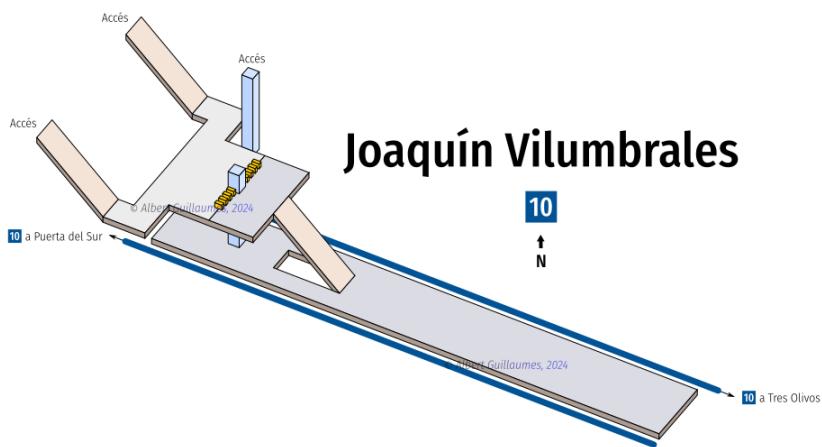


Figura C.56: Representación de la estación de Joaquín Vilumbrales. Fuente: albertguillaumes.

- Puerta del Sur: se trata de la estación final de la línea 10 y se encuentra situada entre los distritos Norte y Suroeste, en la intersección de las avenidas de Olímpico Fernández Ochoa con Leganés. Esta parada fue abierta al público el 11 de abril de 2003, y actualmente sirve de punto de conexión entre la L10 y la línea 12. Pertenece a la Zona B1 y tiene un total de dos andenes que, en lo que respecta a la L10, va en una única dirección de vuelta a Joaquín Vilumbrales.

Además, presenta tres entradas, dos. Por la avenida de la Libertad (pares e impares, ambos con ascensor) y otro acceso a través de la avenida Olímpico Francisco Fernández Ochoa.

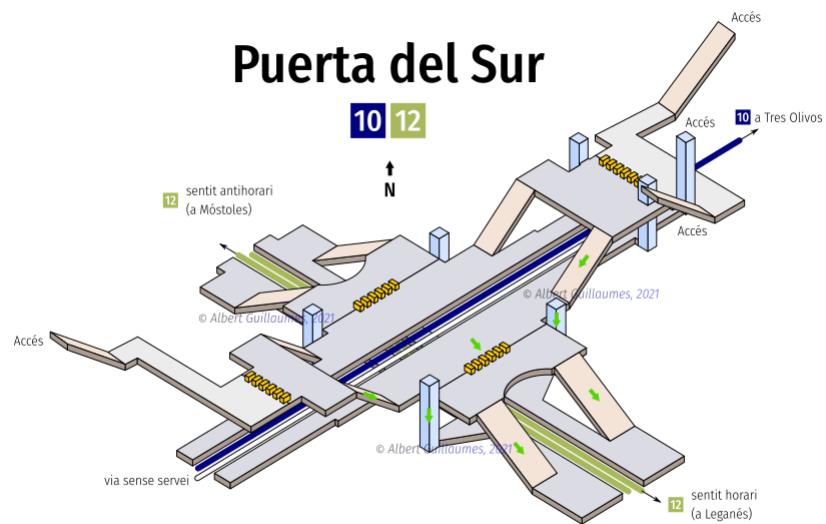


Figura C.57: Representación de la estación de Puerta del Sur. Fuente: albertguillaumes.

Las representaciones gráficas de las estaciones han sido tomadas de la web de Albert Guillaumes [23]

Apéndice D

Anexo IV: recibo de Turnitin

Capítulo D. Anexo IV: recibo de Turnitin

Paper Title	Uploaded	Grade	Similarity
TFG_II_Manuel_Sánchez_Chapado.pdf	03 Jun 2024 18:06	--	10%   

turnitin 

Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: MANUEL SANCHEZ CHAPADO
Assignment title: Turnitin Memoria Final (Moodle PP)
Submission title: TFG_II_Manuel_Sánchez_Chapado.pdf
File name: 25270_MANUEL_SANCHEZ_CHAPADO_TFG_II_Manuel_Sánchez...
File size: 12.19M
Page count: 141
Word count: 34,048
Character count: 165,325
Submission date: 03-Jun-2024 06:06PM (UTC+0200)
Submission ID: 2394707626



Universidad Politécnica
de Madrid
Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Informáticos
Grado en Ingeniería Informática
Trabajo Fin de Grado
**Modelo de Simulación de las Líneas 6 y
10 del Metro de Madrid**

Autor: Manuel Sánchez Chapado
Tutor: Juan Antonio Fernández del Piso

Madrid, junio 2024

Copyright 2024 Turnitin. All rights reserved.

Este documento esta firmado por

	Firmante	CN=tfgm.fi.upm.es, OU=CCFI, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
	Fecha/Hora	Mon Jun 03 21:47:10 CEST 2024
	Emisor del Certificado	EMAILADDRESS=camanager@etsiinf.upm.es, CN=CA ETS Ingenieros Informaticos, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
	Numero de Serie	561
	Metodo	urn:adobe.com:Adobe.PPKLite:adbe.pkcs7.sha1 (Adobe Signature)