

# **ESTIMACIÓN DE DENSIDAD DE PASAJEROS EN EL SISTEMA DE METRO DE MADRID PARA TOMA DE DECISIONES OPERATIVAS BASADA EN MODELIZACIÓN**

**Irene Gallart Gil**

Metro de Madrid, España

**Gonzalo Carmena Vives**

Metro de Madrid, España

**Eduardo Rodríguez Pastor**

Metro de Madrid, España

**Ignacio Galindo Pinto**

PTV Group Iberia

## **RESUMEN**

Un correcto seguimiento del funcionamiento del sistema de Metro de Madrid desde la perspectiva del usuario exige disponer de información del número de viajeros en todo momento y para cada elemento del sistema: estaciones, vestíbulos, andenes y vehículos. La contraposición de volúmenes y capacidades de cada uno de estos elementos permiten deducir densidades que se relacionan de forma directa con el concepto de calidad del servicio.

Frente a la opción de monitorización ubicua de los volúmenes de viajeros a lo ancho del sistema, Metro de Madrid ha optado por una inteligente combinación de datos de registros discretos (vinculados a los accesos al sistema), datos de patrones de movilidad espaciales y dinámicos (basados en encuestas y uso de títulos de transporte) y el uso de técnicas de modelización para completar una fotografía permanentemente actualizada del uso de cada elemento del sistema de Metro.

La comunicación que se presenta describirá la arquitectura y problemática enfrentada, así como el desempeño actual del sistema y planteamiento de futuro.

Finalmente, la comunicación incluirá una descripción de cómo tal sistema, diseñado y elaborado con anterioridad a la situación pandémica actual, ha resultado clave para la construcción de sistemas de control dinámico automatizado de las instalaciones de acceso a la red mediante la explotación de las estimaciones de flujo de viajeros proporcionadas por el modelo.

## 1. INTRODUCCIÓN: PLANTEAMIENTOS ESTRATÉGICOS PARA LA GESTIÓN AVANZADA DEL TRANSPORTE PÚBLICO

La correcta supervisión y gestión del funcionamiento de un sistema de transporte como el Metro de Madrid exige disponer de información de volúmenes de viajeros en todo momento y para cada elemento del sistema: acceso a estaciones, vestíbulos, andenes y vehículos.

La contraposición de volúmenes y capacidades de cada uno de estos elementos permiten deducir densidades que se relacionarán de forma directa con el concepto de calidad del servicio.

Todo operador de transporte que aspire a colocar al cliente y su experiencia de viaje en el centro debe de procurar tener bajo control este parámetro.

Al mismo tiempo, la optimización en la toma de decisiones operativas implica pasar de la mera observación del “fenómeno” a tratar de predecir su evolución. Así, el operador aspira a pasar del enfoque reactivo de resolución de incidencias al proactivo de evitación de éstas.

Este sería el contexto conceptual en el que tienen cabida los trabajos descritos en la presente comunicación. Trabajos que, es importante destacar, parten de la propia compañía de transportes contando con colaboraciones externas especializadas, procedentes del mundo académico y de la investigación.

En un plano más prosaico, se daba la circunstancia de que la *División de Operación* venía recibiendo de su homóloga de *Calidad*, entre otras, requerimientos de informes periódicos que incluyeran indicadores del tipo: densidad de personas en puntos de la red, zonas de mayor tránsito o volumen de viajeros afectados por determinados fallos en la operación.

Estos fallos podían hacer referencia a situaciones tales como retrasos en servicios o afecciones por escaleras mecánicas averiadas.

Para poder dar respuesta a estos requerimientos, el equipo de *Movilidad* del *servicio de Planificación y Estudios de Operación de Metro de Madrid* (en adelante, “Metro”) venía explotando una herramienta de modelización cuya configuración había quedado obsoleta, como diagnosticó la auditoría técnica encargada a los servicios profesionales de *PTV Group*.

Es en ese momento cuando Metro decide reformular el sistema al completo (no solo el modelo) para dar respuesta adecuada al reto planteado y al mismo tiempo preparar las bases para nuevas formas de explotar la información disponible en beneficio de los procesos de programación de la oferta de servicio.

Idealmente, pudiera pensarse que una opción hubiera sido la de monitorizar de forma ubicua, mediante dispositivos, los volúmenes de viajeros a lo ancho del sistema. Sin embargo, tal opción, a pesar de proporcionar información situacional valiosa se demostraría insuficiente, además de costosa por la extensión y complejidad de la Red, si no se completara con algún tipo de artefacto predictivo. Dicho lo cual, no se descarta ampliar en el futuro las capacidades de monitoreo para aprovechar la evolución de la tecnología especializada para recuento y transmisión de datos.

De otra manera, podría confiarse en la realización de encuestas origen – destino de forma periódica, como ya se venía trabajando. Sin embargo, las encuestas OD solo se podían realizar cada 4 o 5 años por su elevado coste y las simulaciones que se basaban en sus resultados pronto perdían fiabilidad a pesar del esfuerzo en mantenerlas actualizadas mediante el uso de técnicas de corrección. Y es que la encuesta OD no deja de ser una foto fija del momento, lo que no permite afrontar el tratamiento, no ya de incidencias, sino tampoco de actualizaciones de la red, como se puso de manifiesto al introducir las últimas ampliaciones del Metro.

El análisis de las asignaciones de esas matrices permitía estimar únicamente los movimientos en el total del día y en hora punta de la mañana de un día genérico, sin poder acceder al detalle de lo que sucedía durante el resto del día, ni en los días especiales como festivos o fines de semana. Otra limitación de esta manera de proceder es que las simulaciones están basadas en las encuestas realizadas un determinado día.

Todo ello llevó a plantear qué cambios había que hacer para conocer mejor el comportamiento de los viajeros y así ayudar a planificar la oferta de trenes de manera óptima.

Así es cómo Metro decidió optar por buscar una combinación de datos de registros discretos (vinculados a los accesos al sistema), datos de patrones de movilidad espaciales y dinámicos (basados en encuestas y uso de títulos de transporte) y el uso de técnicas de modelización para completar una fotografía permanentemente actualizada del uso de cada elemento del sistema de Metro.

El resultado es una herramienta de simulación con actualización continua de la representación teórica de los viajes que se realizan cada día con origen y destino en estaciones de Metro y del volumen de pasajeros a bordo de los trenes de las distintas líneas a lo largo de la jornada.

Este modelo diario constituye el soporte esencial para diversos procesos de adecuación de la oferta a la demanda, optimización del servicio programado y cálculo de indicadores corporativos, así como para dar respuesta a múltiples consultas que plantean frecuentemente tanto los departamentos de Metro como algunos organismos externos.

La imprevista llegada de la Covid-19 planteó un reto no previsto inicialmente: cómo utilizar el sistema desarrollado para la producción de estudios de demanda de soporte a la adecuación a corto plazo de las condiciones de servicio de Metro a las restricciones impuestas por el Consorcio de Transportes de Madrid.

Entre las muchas actuaciones orientadas a asegurar el viaje en condiciones sanitarias adecuadas en lo referente a la ocupación de los trenes, la autoridad de transporte requirió a Metro garantizar que los trenes no superaran cierto umbral de número de viajeros por Metro cuadrado (densidad de viajeros) y que se limitara el número de asientos disponibles.

El cumplimiento de las restricciones de densidad ha supuesto, por una parte, ajustes en la oferta de servicios y, por otra, limitaciones al acceso de viajeros en estaciones. Este requisito plantea la cuestión de en qué estaciones aplicar la limitación, cuándo y en qué cantidad.

Dado que la saturación en un tren, entendida como superación del umbral de densidad, es originada por el acceso en estaciones “aguas arriba” del tramo saturado, se precisa de una aplicación que identifique con anticipación los tramos en los que, si no se actuara, registrarían saturación. A continuación, el procedimiento debe identificar las estaciones que más contribuyen a la carga de las secciones críticas y, como resultado final, ayude a calcular unas cuotas máximas de viajeros compatibles, para cada intervalo de tiempo, con el criterio límite de saturación.

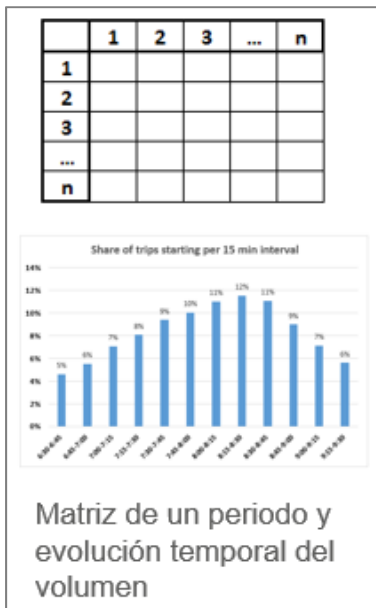
Esta comunicación presenta el esquema general del sistema de modelización de Metro y expone en concreto la utilización de las prestaciones de *PTV Visum* que participan en el sistema de cálculo de cuotas para control dinámico de acceso.

## **2. PLANTEAMIENTO Y METODOLOGÍA**

### **2.1. Enfoque global**

En un primer momento se planteó la posibilidad de mejorar la precisión de las asignaciones de las matrices origen-destino proveniente de las encuestas mediante el uso de “series temporales”. Las “series temporales” en *Visum* distribuyen la demanda de la matriz en el tiempo, típicamente en intervalos horarios del día tipo.

Además, con objeto de precisar el ajuste al comportamiento real de la demanda, *Visum* permite aplicar series temporales diferentes a distintas categorías de pares origen-destino que presenten similitudes en su distribución temporal de la demanda.



**Fig. 1: Ilustración de la consideración de la dinámica de la demanda mediante aplicación de una serie de temporal de proporciones a una matriz OD**

No obstante, este procedimiento pronto se reveló insuficiente porque no recogía adecuadamente la dinámica de la demanda a lo largo de la jornada, razón por la cual se optó por un procedimiento alternativo más detallado.

Bajo este nuevo enfoque, las estaciones pasan a modelizarse de forma independiente y los intervalos de tiempo a efectos de análisis de la demanda pasan a ser de 15 minutos aprovechando para ello la información de registros de entradas al sistema disponibles.



**Fig. 2: Ilustración de consideración de la dinámica de la demanda mediante series de matrices OD por intervalos de tiempo**

Desde una perspectiva metodológica, el proceso consta de tres etapas:

- a. Explotación de los datos de las validaciones recurriendo a técnicas Big Data para:
  - i. Inferir el destino del viaje
  - ii. Estimar matrices de viajes origen-destino para intervalos de 15 minutos
  - iii. Estimar unos intervalos de trenes teóricos según las frecuencias de paso previstas

En esta etapa se infieren las matrices diarias que alimentan la siguiente etapa del proceso. Para ello Metro de Madrid ha realizado un desarrollo software propio cuya descripción excede el alcance de esta comunicación.

- b. Explotación de un modelo de transportes utilizando *Visum* para determinar los tramos de mayor intensidad

En esta etapa se aprovecha toda la potencia de la herramienta para simular el comportamiento de los usuarios tanto espacialmente, en sus decisiones de itinerarios a tomar, como temporalmente.

- c. Establecimiento de un sistema de cuotas

Se trata de un proceso iterativo de optimización cuyo resultado son las cuotas de paso, entendidas como límites al acceso de viajeros, a aplicar en las estaciones de origen para reducir el riesgo de congestión en tramos críticos de la red.

Estas cuotas son grabadas en ficheros que son leídos por los sistemas de gestión de las instalaciones de peaje (pasos de entrada en estaciones).

Esta etapa ha precisado de desarrollos ad-hoc en comunicación con utilidades nativas del software de modelización.

Los bloques funcionales a) y b) corresponden al proceso básico que construye la actualización diaria del modelo, mientras que el bloque c) constituye el caso de uso específico de elaboración del listado de cuotas.

Es preciso mencionar que el sistema completo denominado “*Control temporal de accesos de Metro de Madrid*” se compone de varios subsistemas: el software de telemando de los elementos físicos que abren/cierran el paso según las órdenes recibidas, los recursos de comunicación y gestión de datos para analizar el comportamiento real, los procedimientos y el despliegue de personal que vigila in situ el correcto desarrollo de los dispositivos y cuida la atención a los viajeros, la información local en las estaciones mediante megafonía y teleindicadores y, finalmente, la presentación del estado de las barreras de peaje en la app oficial que los usuarios pueden consultar on line desde sus dispositivos móviles.

La descripción del sistema completo excede el ámbito de este artículo, por lo que, en este contexto, debe entenderse que por “control de acceso” se hace referencia exclusivamente al software de elaboración de los listados de cuotas, como pieza de cálculo que alimenta al resto de componentes.

## 2.2 Detalles de configuración

Respecto a la herramienta de modelización, se ha empleado el “gestor de escenarios” disponible en la versión más reciente de *Visum*. Esta funcionalidad permite estructurar los distintos escenarios de análisis sobre un mismo modelo base común sobre el que se aplican modificaciones relativas a la oferta de servicios o a la demanda que los solicita.

Con periodicidad anual se genera un nuevo proyecto del gestor de escenarios. En él se integran los distintos escenarios, cada uno de los cuales hace referencia a un periodo diario.

Estos escenarios pueden hacer referencia bien a días tipo (por ejemplo, un día tipo laborable del mes de octubre) o a días concretos del calendario (por ejemplo, el 28 de octubre).

Asimismo, los escenarios pueden ser *a posteriori*, esto es, con datos de demanda de días pasados y por tanto reales, o *a priori*, esto es, con datos de demanda previstos para días futuros.

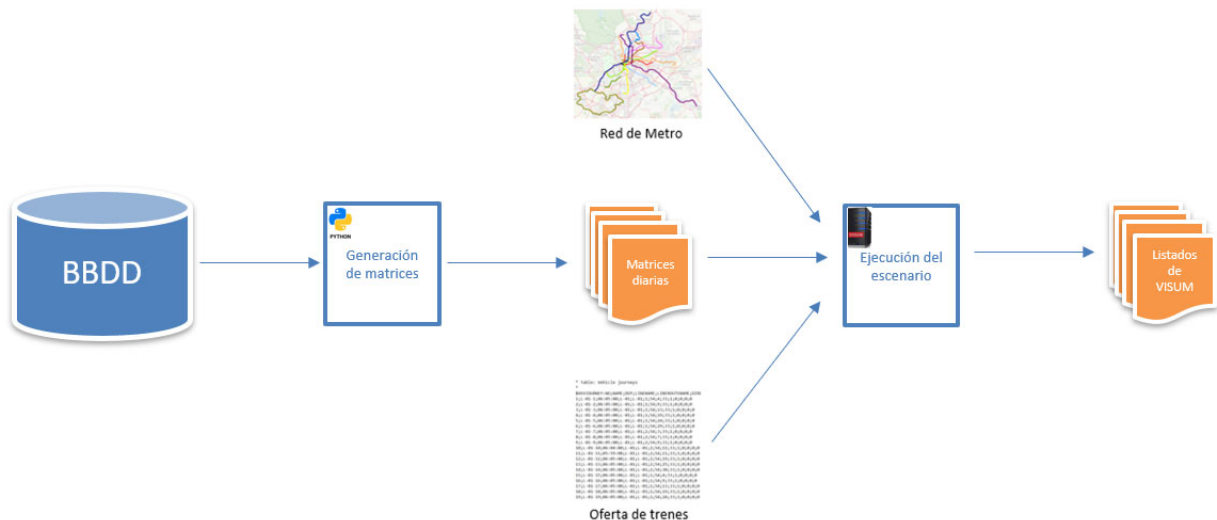
Cada escenario consta de tres entradas básicas: la red de Metro, la oferta de servicios (oferta de trenes en terminología Metro), y las matrices Origen-Destino de los viajes.

La red de Metro es fija, y por tanto común a todos los escenarios, aunque sufre cambios circunstanciales en determinados periodos, como cortes de línea o estaciones cerradas al público que se manejan con estudios específicos para simulación de cambios en la infraestructura.

La oferta de trenes se introduce como una relación de expediciones teóricas, que es fija para cada periodo del año y para cada tipo de día, por ejemplo, las expediciones teóricas de un día laborable de invierno.

Las matrices Origen-Destino son únicas para cada día.

La Figura 3 representa el esquema conceptual de la metodología utilizada:



**Fig. 3. Esquema conceptual del proceso metodológico**

### 2.3 Evolución tecnológica y acceso a datos: el recurso a Big Data para la modelización y análisis de la demanda

Como ya se ha indicado, el punto de partida convencional para la modelización son los datos que proporcionan las encuestas y aforos, de gran valor estadístico, pero con los inconvenientes de estar referidos a un determinado momento y de no cambiar hasta que se realiza un nuevo trabajo de campo, con un importante coste asociado.

Desde 2019, Metro viene utilizando los registros de paso con tarjetas “inteligentes” de transporte, para construir matrices Origen-Destino diarias.

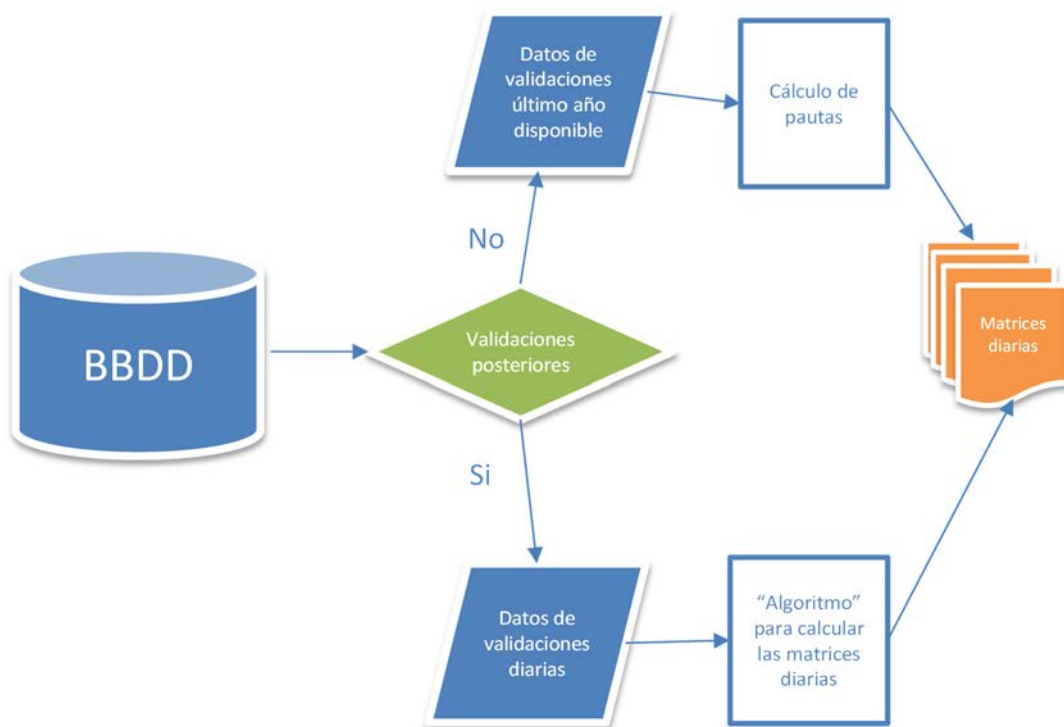
La base de datos de los pasos con tarjetas sin contacto informa de forma individualizada pero anónima en qué estación y a qué hora se producen las entradas por las barreras de peaje. Mediante inferencia de los destinos de los viajes por la actividad subsiguiente de las tarjetas, y técnicas de corrección de matrices, se obtiene un conjunto de matrices Origen-Destino para los intervalos de tiempo relevantes.

En este caso se han elegido periodos de 15 minutos, por lo que, para cada jornada completa, se construyen 96 matrices O-D.

Estos datos aportan la ventaja de estar siempre actualizados sin necesidad de realizar ninguna encuesta ni aforo. De esta forma, la utilidad de las encuestas y aforos pasa a ser la de su uso para comprobar si el modelo generado está bien calibrado o es necesario realizar algún ajuste.

El esquema lógico conceptual de esta fase del proceso desarrollado es el que ilustra la Figura 4.





**Fig. 4. Esquema lógico de la generación de matrices OD a partir de las validaciones**

Dado que la mayor parte de la red de Metro tiene salida abierta, para completar la información de origen de los viajes con los destinos se emplean diversas técnicas de asignación en las que se combinan factores como el tiempo de viaje, tipo de estación, frecuencia de viaje, y pautas repetitivas, a partir de las cuales se aplican como reglas de decisión para la asignación de punto de salida más probable.

También hay que señalar que los tipos de títulos más usados, los abonos de transporte y los billetes de 10 viajes, tienen validez en otros operadores de la ciudad, lo que añade la necesidad de aplicar reglas especiales para reconstruir los trayectos multimodales y derivar la parte que corresponde exclusivamente a etapas en Metro.

El algoritmo desarrollado genera asignaciones de destino para los orígenes de viaje y califica la calidad de dicha asignación en función de las condiciones y certezas que se han podido aplicar en cada caso según los patrones reconocidos.

#### **2.4 Validación de resultados y construcción del modelo diario de movilidad**

A pesar de las limitaciones mencionadas, el contraste de resultados realizado mediante observación directa en campo ofrece un nivel de confianza muy elevado.

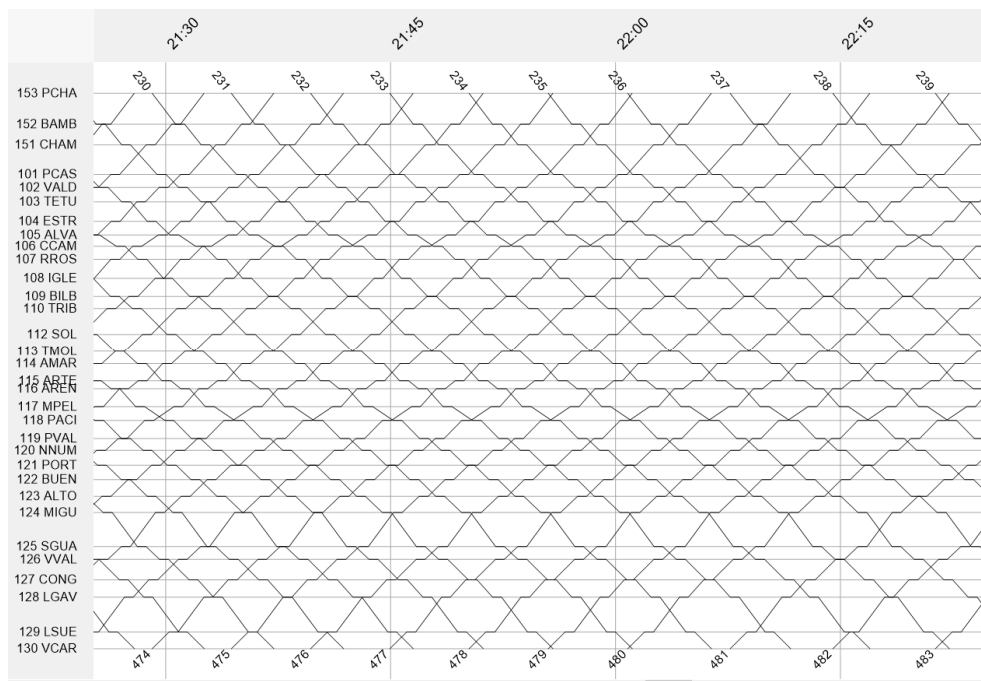
La calidad de las matrices Origen – Destino diarias así generadas se ha visto avalada también por la utilización en otros sistemas de información que se deriva de las mismas, como es por ejemplo, la estimación estadística de la carga de trenes a su paso por cada estación, por franjas temporales discretas.

Con el grado de ajuste actual, se estima que el 86% de las asignaciones de destino tienen una probabilidad de acierto “ALTA” y que de ellas, la probabilidad es “MUY ALTA” en el 62% de los casos. La asignación de destinos se ajusta mejor en días laborables que en fines de semana porque los viajes obligados, por trabajo o estudios, presentan pautas más repetitivas.

Estos resultados se consideran suficientemente fiables como para permitir el paso siguiente: realizar la modelización diaria de la movilidad por la red a lo largo de todo el horario de servicio y para todos los tipos de día.

Para ello, se cargan en *Visum*:

- Las 96 matrices del conjunto de matrices Origen-Destino por jornada que genera la aplicación, cada una de las cuales corresponde a los datos de entrada a la red cada 15 minutos.
- El fichero con información de la red. Este fichero incluye la descripción de los distintos tipos de día que se contemplan, algunas características de las líneas, los distintos perfiles de tiempo de recorrido, o las expediciones teóricas en función del periodo (invierno, verano, ...), visualizado gráficamente en la Figura 5.



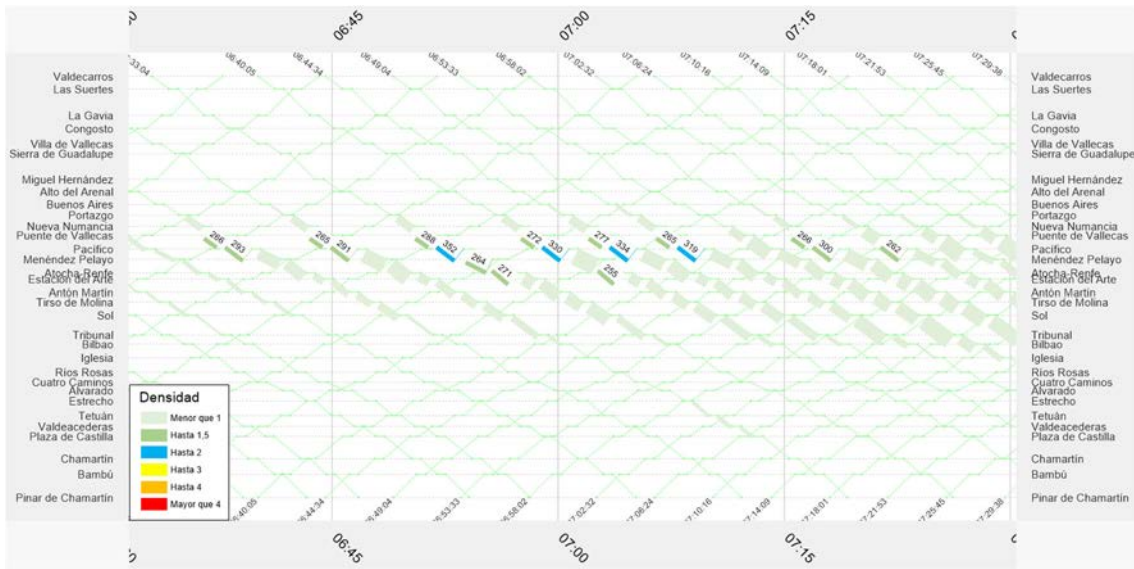
**Fig. 5. Gráfica de trenes teóricos**

La asignación del escenario en *Visum* proporciona la identificación de todos los viajes realizados, asequible en forma de listados (Figura 6), que muestran la secuencia de unidades de viaje elementales (*vehicle journey item* en vocabulario de *Visum*), y da información de la densidad (en pasajeros/m<sup>2</sup>) que hay al paso de cada tren por cada estación:

Number	Line	Veh	Index	TimeProfileItem	TimeProfileItem	LineRouteItem	Stop	VehJourneyNo	Dep	ExtArriv	ExtDepd	PassBoard(AI)	PassOrigin(AF)	PassAlight(AF)	PassDestinat	Vol(AP)	Densidad	VehA	VehJourney	VehJourney
1	L-10A	Via 2	9	21011012	Principe Pio			17019	07:48:35	07:47:57	07:48:35	290,9	130,9	53,6	18,8	666,0	2,73	0	180	1274
2	L-12-M	Via 1	25	11211206	Mostoles Central			19942	14:23:33	14:22:53	14:23:33	89,3	89,3	70,5	70,5	321,2	2,73	0	78	631
3	L-10A	Via 2	11	21011010	Tribunal			17010	07:22:58	07:22:10	07:22:58	35,6	10,2	26,5	7,4	670,2	2,69	0	180	1274
4	L-10A	Via 2	12	21011009	Alonso Martínez			17010	07:24:39	07:23:52	07:24:39	63,6	7,7	64,0	21,2	669,8	2,69	0	180	1274
5	L-06	Via 1	11	10610611	Conde de Casal			8876	07:17:29	07:16:41	07:17:29	89,8	89,8	46,6	46,6	658,0	2,69	0	158	1272
6	L-10A	Via 2	9	21011012	Principe Pio			17010	07:19:09	07:18:21	07:19:09	299,5	119,7	96,0	22,6	663,0	2,65	0	180	1274
7	L-10A	Via 2	10	21011011	Plaza de España			17010	07:21:06	07:20:19	07:21:06	51,0	15,8	52,9	20,1	661,1	2,64	0	180	1274
8	L-01	Via 2	12	20110119	Puente de Vallecas			1360	06:54:21	06:53:46	06:54:21	73,1	73,1	5,8	5,8	434,7	2,64	0	144	804
9	L-12-M	Via 1	26	11211207	Pradillo			19942	14:25:08	14:24:33	14:25:08	45,4	45,4	58,2	58,2	308,4	2,59	0	78	631
10	L-12-M	Via 1	24	11211205	Universidad Rey Juan Carlos			19942	14:21:27	14:20:52	14:21:27	179,0	179,0	18,5	18,5	302,4	2,59	0	78	631
11	L-06	Via 1	12	10610612	Sainz de Barañán			8896	08:21:28	08:20:41	08:21:28	62,0	11,9	33,2	26,7	624,7	2,51	0	158	1272
12	L-10A	Via 2	13	21011008	Gregorio Marañón			17010	07:26:47	07:26:00	07:26:47	122,1	6,4	157,4	28,2	634,5	2,51	0	180	1274
13	L-10A	Via 2	11	21011010	Tribunal			17019	07:52:24	07:51:36	07:52:24	54,6	11,7	51,7	17,9	632,3	2,49	0	180	1274
14	L-01	Via 2	12	20110119	Puente de Vallecas			1359	06:46:53	06:46:18	06:46:53	78,5	78,5	8,4	8,4	416,8	2,48	0	144	804
15	L-06	Via 1	11	10610611	Conde de Casal			8882	07:37:16	07:36:28	07:37:16	71,8	71,8	44,0	44,0	618,8	2,48	0	158	1272
16	L-10A	Via 2	10	21011011	Plaza de España			17019	07:50:32	07:49:45	07:50:32	48,3	18,2	104,9	36,7	629,4	2,47	0	180	1274
17	L-06	Via 1	10	10610610	Pacífico			8876	07:15:39	07:14:52	07:15:39	124,8	28,6	56,5	18,3	614,8	2,46	0	158	1272
18	L-10A	Via 2	12	21011009	Alonso Martínez			17005	07:02:21	07:01:34	07:02:21	86,8	5,0	40,8	14,3	624,4	2,44	0	180	1274
19	L-06	Via 1	13	10610613	O'Donnell			8896	08:23:19	08:22:31	08:23:19	24,8	24,8	40,6	40,6	608,9	2,42	0	158	1272
20	L-03	Via 1	12	10310305	Lavapiés			3981	07:42:23	07:41:47	07:42:23	24,6	24,6	3,2	3,2	403,8	2,37	0	138	810

**Fig. 6. Información de densidades (en viajeros/m2) al paso de cada tren por cada estación**

O en forma gráfica, en la Figura 7 se muestra, sobre la malla de expediciones, cuán cargadas han ido éstas para un determinado día.



**Fig. 7. Carga de trenes teóricos para una demanda dada en un periodo dado**

La información detallada en cada punto de la red, en concreto, los datos de subidos y bajados en cada parada, así como el volumen de viajeros en cada inter-estación son datos clave.

Estos datos se calculan tanto para cada día concreto, como para cada patrón de día (laborables, viernes, sábados, y festivos) y periodo (un mes concreto o un periodo especial) que interese estudiar.

Los datos se obtienen desagregados a nivel de expedición y parada y, por tanto, se pueden tratar al nivel que interese: jornada completa, periodos significativos del día (hora punta de mañana, hora punta de mediodía, hora punta de tarde y periodos valle) o a nivel de hora o de media hora.

El contraste continuo con fuentes de información cualitativa permite mantener un adecuado nivel de confianza en la parametrización de los procesos automáticos. Como ejemplo de la

necesaria calibración, se realizaron unos aforos en ciertas estaciones que llevaron a la conclusión de que había que realizar ciertos ajustes en los tiempos de trasbordo entre andenes en la estación de Nuevos Ministerios. O en las estaciones de Moncloa y Argüelles, que constituyen una singularidad por ser dos estaciones consecutivas en las que se puede realizar transbordo entre las líneas 3 y 6 de Metro. La medición real del tiempo que se tarda en transbordar en una y en otra, proporciona unos resultados que modificaron los datos asociados a ambas estaciones para que el porcentaje de transbordos en una y otra estación se ajustase a la realidad.

El modelo así construido está sirviendo actualmente de apoyo a múltiples decisiones operativas, permitiendo, por ejemplo:

- Anticipar el efecto de cortes planificados en líneas, tramos o estaciones. La redistribución de la demanda reflejada en el modelo en tales casos permite tomar las decisiones oportunas para canalizarla convenientemente en la realidad. Asimismo, la consideración temporal de la demanda permite apoyar decisiones relativas a la programación de estas afecciones al servicio.
- Analizar el efecto sistémico en la red de cambios en la demanda en determinadas estaciones debida a alteraciones puntuales tales como la celebración de eventos públicos en su proximidad o cambios en la oferta de transporte en superficie.

Con independencia de estas aplicaciones particulares del modelo, las asignaciones de demanda diaria, agregadas por periodos estacionales de demanda estable y días tipo, se han convertido en pieza fundamental de la planificación operativa de Metro en lo que se refiere a la adecuación de la oferta de servicios a la demanda en todo momento.

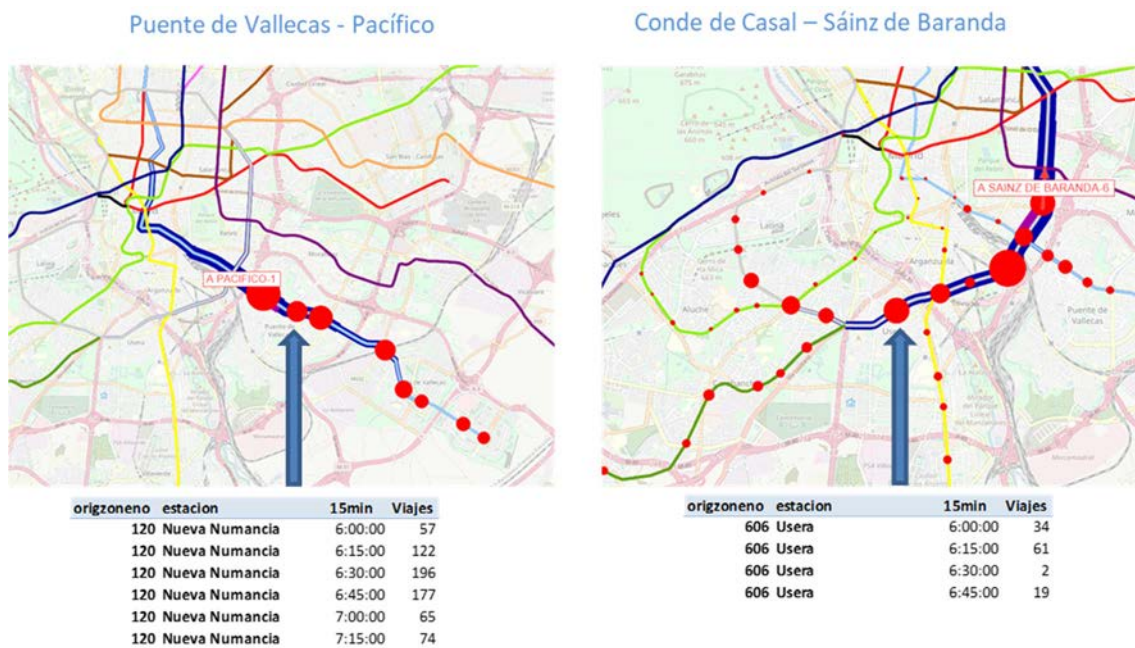
Desde que se dispone de matrices Origen-Destino basadas en los registros de acceso con tarjetas de transporte el modelo diario se está utilizando para todos los propósitos en los que hasta el momento se contaba con modelos estáticos ajustados periódicamente, y se han abierto nuevas posibilidades de explotación, inabordables antes de disponer de una estimación con gran nivel de detalle y de un soporte tecnológico adecuado.

### **3. UN CASO DE USO ASOCIADO A COVID-19: CÁLCULO DE CUOTAS DE ACCESO PARA PREVENIR LA SATURACIÓN DE LOS TRENES**

Una situación de congestión, valorada como tal por superación de la densidad límite establecida, en un tren en una determinada inter-estación, viene provocada por la entrada de viajeros no sólo por la estación en que se inicia, sino por las entradas y trasbordos acumulados desde otras estaciones anteriores en la misma expedición. Por tanto, uno de los objetivos de la aplicación desarrollada es determinar en qué estaciones hay que limitar el acceso de viajeros y en qué cantidad, para que no se congestione la red en ningún punto.

De esta manera, es necesario identificar en primer lugar en qué puntos de la red se presenta riesgo de exceso de carga a bordo y buscar a continuación por dónde han entrado los viajeros que lo provocan. Con esto, es posible calcular una cuota teórica de entrada en dichas estaciones para un cierto periodo de tiempo que reduciría el riesgo de que llegara a producirse.

En la implementación de este procedimiento, *Visum* juega un doble papel. Por un lado, ofrece un listado detallado de caminos denominado *PuT Path Legs* (en terminología *Visum*) que permite trazar el origen de cada viaje que pasa por un determinado punto de la red en un determinado momento, como el que ilustra la Figura 8 para dos casos distintos.



**Fig. 8. Utilización de Visum para el análisis de los orígenes de secciones críticas de la red**

Por otro lado, una vez se ha establecido la cuota de cada estación y se han generado matrices corregidas, es necesario comprobar que el nuevo conjunto de matrices no genera congestión en ningún otro punto de la red.

La Figura 9 ilustra la lógica de este procedimiento iterativo, para el que es preciso establecer condiciones de convergencia compatibles con la realidad del tránsito por las estaciones. Este procedimiento automatizado precisa de la actuación del personal de Metro que, basado en su experiencia, valida la idoneidad de la solución propuesta, haciendo balance del perjuicio ocasionado a viajeros a los que se deniega el acceso con el beneficio esperado en los sectores en riesgo de congestión.

Esta parte de la lógica está implementada mediante un software complementario a los procesos estándar de *Visum*.



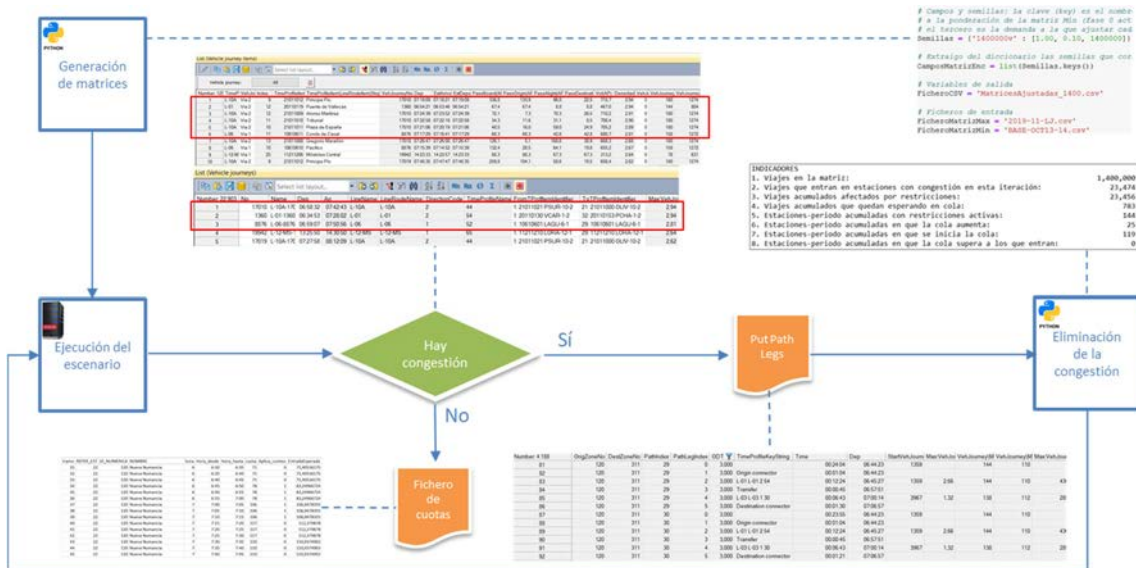


Fig. 9. Establecimiento de cuotas por estación y periodo de 5 minutos

Es preciso insistir en que los productos de este caso de uso tienen una repercusión directa e inmediata en la percepción de los viajeros, que pueden verse detenidos unos momentos en las barreras de paso sin conocer el motivo, situación cuando menos incómoda para ellos y difícil de manejar para el personal de las estaciones. Por este motivo, el procedimiento implantado trata con la misma importancia la exactitud de los cálculos teóricos como la oportunidad de aplicarlos en la práctica.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS PRELIMINARES

El producto de la ejecución del proceso descrito en el apartado anterior es un listado con la cuota máxima de viajeros por estación y periodo de 5 minutos, como el que ilustra la Figura 10.

tramo	ID_NUMERICA	NOMBRE	hora	Hora_desde	Hora_hasta	cuota	Aplica_conteo	EntradaEsperada
31	120	Nueva Numancia	6	6:30	6:35	70	0	70
32	120	Nueva Numancia	6	6:35	6:40	70	0	70
33	120	Nueva Numancia	6	6:40	6:45	70	0	70
34	120	Nueva Numancia	6	6:45	6:50	78	1	83
35	120	Nueva Numancia	6	6:50	6:55	78	1	83
36	120	Nueva Numancia	6	6:55	7:00	78	1	83
37	120	Nueva Numancia	7	7:00	7:05	95	1	96
38	120	Nueva Numancia	7	7:05	7:10	95	1	96
39	120	Nueva Numancia	7	7:10	7:15	95	1	96
40	120	Nueva Numancia	7	7:15	7:20	118	0	113
41	120	Nueva Numancia	7	7:20	7:25	118	0	113
42	120	Nueva Numancia	7	7:25	7:30	118	0	113

Para la estación 120 (Nueva Numancia) y los periodos 34 (6:45 – 6:50), 35 (6:50 – 6:55) y 36 (6:55 – 7:00):

- cuota = 78 -> La cuota máxima de viajeros es 78 (234 en los 15 minutos)
- Aplica\_conteo = 1 -> Es necesario establecer dispositivo para limitar el acceso
- EntradaEsperada = 83 -> Se estima que 83 (249 en los 15 minutos) viajeros quieren acceder
- 83 – 78 = 5 -> Se quedan 5 viajeros esperando en cada periodo (15 en los 15 minutos)

Fig. 10. Ejemplo del establecimiento de cuotas.

Este listado con las cuotas se utiliza en los sistemas de control de los accesos que programan los torniquetes de entrada en las estaciones, de forma que para cada lapso se permita o no la entrada de viajeros en función de si el recuento de entradas en tiempo real cumple los cupos parametrizados mediante dicho listado.

Para asegurar el buen funcionamiento del sistema completo de “control de aforos”, el personal de la estación y el del puesto de telemando se encarga de comprobar continuamente todos los componentes y proporciona el retorno tanto a los mantenedores de los equipos físicos de peaje y de información a viajeros, como a los responsables del establecimiento de cuotas.

## 5. CONCLUSIONES

El proceso de estimación de la ocupación de los trenes en Metro de Madrid ha presentado hasta el momento grandes dificultades por la ausencia de medios físicos de conteo a bordo.

Actualmente, la Compañía estudia diferentes prototipos de diversas tecnologías. No obstante, la red de Metro de Madrid es extensa, compleja en sus infraestructuras y equipamientos y con un gran parque móvil. Por tanto, el desarrollo e implantación de los citados prototipos se realizará cuando lo aconsejen las condiciones de retorno de la gran inversión que supone su instalación y, sobre todo, su despliegue completo.

Con los medios de simulación disponibles para los estudios de Movilidad y Planificación de Operación, se ha construido un sistema de estimación de densidades de viajeros basado en los registros de entradas al sistema con resultados muy satisfactorios.

El modelo de asignación de demanda elaborado sobre la plataforma *Visum* de PTV Group constituye una de las piezas clave del motor de cálculo del sistema. Sus potentes procedimientos de asignación y análisis proporcionan las herramientas básicas para resolver el problema de relacionar numéricamente el origen de los viajes con la carga a bordo de las expediciones teóricas de los trenes para cada unidad elemental de la red por localización y unidad de tiempo.

Son muchas las utilidades prácticas a las que Metro aplica el modelo diario de movilidad.

Es este artículo se ha presentado una de ellas, el cálculo de cuotas para control temporal de acceso que permite reducir el riesgo de congestión en las secciones críticas de la red. Esta práctica, siempre importante, pero particularmente sensible en las actuales condiciones sanitarias en las que la distancia interpersonal en el transporte público no es ya un asunto de confort sino una necesidad social.

La experiencia expuesta muestra como la comunicación entre desarrolladores de software especializado y operadores de transporte público constituye un campo de colaboración fructífero. Con la ayuda de empresas de desarrollo que aportan profesionales de alta categoría para materializar los objetivos, y con la acertada visión global desde la academia y organismos transversales, se pueden obtener productos de gran beneficio a coste asequible gracias a la inteligencia de la modelización teórica avanzada.

Esperamos seguir avanzando juntos por este camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores quieren reconocer la aportación al sistema de monitorización y gestión de la demanda de Metro descrito en este artículo a:

- Resto de áreas de la compañía de Metro de Madrid que intervienen en la operación del sistema: Área de Comunicación y Tecnologías de Información, Área de Ingeniería de Instalaciones y al Área de Medios.
- Grupo TEMA Consultor por su aportación en materia de modelización de transportes y programación.
- Servicios profesionales y de soporte técnico de PTV Group

## **REFERENCIAS**

PTV VISUM 2021 MANUAL. (2020). PTV AG, Karlsruhe, Alemania