



INFORME EJECUTIVO

Mejoramiento y Actualización del Modelo de
Asignación de viajes del Sistema Transantiago

25 de Octubre de 2018

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1-1
2	RECOPIACION DE ANTECEDENTES Y AJUSTE METODOLÓGICO	2-3
3	DEFINICION DE LA HORA DE MODELACIÓN.....	3-5
4	ZONIFICACION.....	4-10
5	ESTIMACION DE LA MATRIZ DE VIAJES	5-23
6	CONSTRUCCIÓN MODELO DE ASIGNACIÓN PUNTA MAÑANA	6-29
7	CALIBRACION MODELO DE ASIGNACIÓN PUNTA MAÑANA	7-34
8	ESCENARIOS DE MODELACIÓN PUNTA MAÑANA.....	8-54
9	ESCENARIOS DE MODELACIÓN CAMBIOS TARIFARIOS	9-57
10	ESTIMACIÓN MATRIZ FUERA DE PUNTA	10-63
11	CONSTRUCCIÓN MODELO FUERA DE PUNTA.....	11-70
12	CALIBRACIÓN MODELO FUERA DE PUNTA.....	12-73
13	ESCENARIOS FUERA DE PUNTA MAÑANA	13-75
14	ESTIMACION DE LA MATRIZ DE VIAJES L6	14-78
15	MODIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN	15-91
16	CAPACITACIÓN	16-92
17	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	17-93

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde al Informe Ejecutivo realizado por la empresa Cityplanning en el contexto del Servicio, requerido por la Secretaría Ejecutiva del Directorio de Transporte Público Metropolitano (en adelante DTPM), que toma el nombre de "Mejoramiento y actualización del modelo de asignación de viajes del sistema Transantiago".

El contexto de este Servicio de Apoyo está dado por las propias funciones de la Secretaría Ejecutiva del Directorio de Transporte Público Metropolitano, en particular la referida a *"Supervisar los contratos, participar en instancias de estudios, análisis y mejoramiento del transporte público."* y la de *"Proponer a las autoridades del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones estudios, planes de licitación de transporte público y las condiciones administrativas, económicas y financieras de dichas licitaciones, así como también el programa presupuestario que se requiera para el cumplimiento del Plan de Transporte Urbano de donde se deriva el Sistema de Transporte Público de Santiago"*.

El objetivo del Servicio es el mejoramiento y actualización del Modelo de asignación de viajes de transporte público desarrollado en plataforma EMME®, para así, apoyar a la autoridad en la toma de decisiones estratégicas asociadas a la definición y ajuste de los planes operacionales que se deben evaluar y sancionar en la DTPM.

Para cumplir con el objetivo del servicio, se plantea una metodología que considera un conjunto de procesos secuenciales que se inician con la revisión de los antecedentes disponibles de interés, seguida por el análisis y la preparación de la información de entrada (red, oferta y demanda), así como de los datos observados para la fase de calibración-validación. Una vez logrado lo anterior, el modelo es apto para la simulación de escenarios.

Las etapas identificadas para el desarrollo del estudio fueron:

Análisis Inicial: esta primera Etapa abarca la revisión y análisis de los antecedentes existentes listados en el artículo 8° de las bases de licitación y otros que el consultor considere relevantes para el desarrollo del estudio. Además, se muestran las metodologías de calibración de matrices y asignación de viajes disponibles en EMME®, de modo de exponer a la contraparte técnica claramente cuáles son los supuestos y cómo se estructuran dichos métodos en la herramienta.

Posteriormente, en conjunto con la contraparte, se realiza un ajuste metodológico a la luz de los antecedentes antes revisados y se valida con la contraparte técnica aspectos iniciales del estudio como son la definición del año base, la metodología propuesta para la zonificación y la hora representativa de la modelación, pues son aspectos iniciales necesarios a considerar para comenzar el trabajo conducente al desarrollo de un Modelo de asignación de viajes en transporte público de buses y metro calibrado para el periodo

punta mañana, que como ya se ha mencionado, tendrá su símil para el periodo fuera de punta mañana.

Adicionalmente y debido a los recientes cambios que ha experimentado el Sistema de Transporte Público Metropolitano, como el nuevo servicio Nos-Express y la mejora de oferta de Metrotren y su integración al sistema Transantiago; así como la puesta en marcha de la Línea 6 de Metro y la eliminación del boleto Edmondson; sumado a la pronta puesta en marcha de la Línea 3 de Metro, hicieron recomendable realizar ajustes metodológicos y actualizaciones no consideradas en el contrato inicial, pero necesarias para que el Modelo de Asignación a ser entregado no esté obsoleto, y sea efectivamente útil en el proceso de planificación y mejoramiento de la red de servicios de transporte. Lo anterior redundó en la estimación de matrices con información más actualizada que la originalmente diseñada y la actualización de escenarios donde se incorpora la línea recientemente construida así como las que están en construcción.

Desarrollo: esta segunda etapa considera la estimación de las matrices de viajes para los periodos punta mañana y fuera de punta, la construcción de los modelos de asignación que considera: la construcción de las redes de modelación, la automatización que permitirá obtener los inputs de los modelos, así como sus posteriores actualizaciones; y la generación de los procesos necesarios para rescatar los resultados de cada corrida. Dichos procesos son generados de tal manera que se resguarde la necesaria compatibilidad entre un Sistema de Información Geográfica (SIG) estándar, y los modelos de asignación de viajes que fueron implementados, permitiendo, por ejemplo, la exportación automática de archivos entre uno y otro software.

Todo lo anterior entrega los elementos necesarios para desarrollar un proceso de calibración que culmina con modelos de asignación calibrados para los periodos punta mañana y fuera de punta, con un conjunto de procesos y herramientas automatizadas que permiten desarrollar actualizaciones, modelar escenarios y extraer resultados con la mayor eficacia, considerando los plazos acotados del proceso de generación y aprobación de los Programas de Operación.

Cabe destacar que, como proceso adicional asociado a uno de los objetivos específicos adicionales, se propuso dejar preparados los archivos para la incorporación de un tercer modo al sistema de transporte público mayor, como podría ser el modo tranvía, el teleférico o el modo tren. Sin embargo, este tercer modo fue incorporado en el desarrollo del presente estudio, quedando así el modo metrotren como parte del sistema de transporte público modelado.

Ejecución e implementación: esta tercera etapa del estudio considera la aplicación de la herramienta a distintos escenarios de análisis acordados con la contraparte técnica, y el desarrollo de un proceso de transferencia tecnológica que considera la instalación de la herramienta al DTPM y la capacitación de sus profesionales.

Durante esta etapa se propuso adicionalmente a lo solicitado en las bases de licitación, aumentar la cantidad de escenarios a evaluar, los que fueron definidos por la contraparte técnica y son reportados en este Resumen.

2 RECOPIACION DE ANTECEDENTES Y AJUSTE METODOLÓGICO

La revisión de antecedentes realizada en el desarrollo de este estudio se concentró en identificar, caracterizar y diagnosticar la pertinencia y calidad de la información disponible para caracterizar el sistema de transporte público de la ciudad de Santiago.

Como consecuencia, de la revisión de los antecedentes fue posible ajustar la metodología de manera de adaptarla a los datos disponibles y a su calidad, lo que se reporta en el capítulo de ajustes metodológicos.

En el caso del presente proyecto, la obtención del Modelo de Asignación de Viajes de Transporte Público de Santiago en el Periodo de Punta Mañana exige un conjunto de tareas que, de manera general están relacionadas con la generación de la red, la introducción de la oferta disponible en ese periodo, la introducción de la demanda y su comportamiento como usuario, así como la calibración y validación del modelo con datos observados.

En consecuencia, fue imperativo analizar los estudios, investigaciones y datos que guardan relación con los anteriores aspectos, previo a la aplicación de la metodología diseñada en cada tarea. Complementariamente, se desarrolla un análisis cualitativo de los datos en cuanto a sus características de naturaleza, recolección, cuantía y antigüedad que concluyen la idoneidad de la información.

Bajo las anteriores consideraciones, se revisan y analizan dos grandes tipos de referencias:

- Revisión bibliográfica: se describe la metodología de estudios anteriores e investigaciones con el fin de identificar los aportes metodológicos que pudieran considerarse en este proyecto, así como los principales resultados y conclusiones que pudieran servir como punto de partida y/o de comparación en alguna de las tareas del mismo.
- Revisión de las bases de datos: se presentan las características de los datos que de alguna manera tienen incidencia en el uso que se hará de ellos en el contexto del presente proyecto, en el diseño de las metodologías o incluso en la interpretación de resultados o conclusiones.

La revisión y análisis realizados tanto de estudios e investigaciones anteriores como de las fuentes de datos permitieron identificar su potencial y deficiencias, lo que en algunos casos requirió de rectificaciones metodológicas. Por ello, a continuación se exponen los ajustes necesarios a la metodología con el fin de considerar eventuales restricciones que pudieran ser necesarias durante la ejecución del estudio y que se derivan de la caracterización de los datos expuesta en la anterior sección, los que fueron incorporados, de tal manera de cumplir cabalmente los objetivos, resguardando la calidad en la ejecución global del estudio y sus resultados.

Los ajustes metodológicos se concentraron en lo siguiente:

- Hora de modelación: se adopta como hora de modelación la banda de una hora de duración de la hora más cargada del sistema, corrigiendo los viajes de las zonas donde la hora más cargada se encuentra fuera de la banda general, siempre y cuando la diferencia de viaje de una zona, entre su hora más cargada y la hora más cargada del sistema, sea considerable.
- Zonificación: se rediseñó el proceso de zonificación para establecer condiciones en el uso de las fuentes de información para así lograr una zonificación robusta que se beneficie de los dos enfoques; en otras palabras, se buscó que la metodología sea un complemento entre el comportamiento de la demanda y los límites administrativos así como también se hará cargo de la representación de las zonas de intermodalidad. Se aseguró que el número de agrupaciones de paradas o zonas se sitúe entre las 1.500 y 2.500 zonas de acuerdo a lo requerido por el mandante; no obstante el número final resultó del propio proceso de zonificación.
- Validación de los resultados de la calibración: se propone un proceso secuencial priorizado de validación de parámetros y ajuste de matriz y se definen en detalle las fuentes de información con las que se construirán los modelos y con aquellas que se realizarán las comparaciones.

3 DEFINICION DE LA HORA DE MODELACION

El objetivo de esta tarea es escoger una hora de modelación tal que el modelo de asignación de viajes del Sistema de Transporte Público de Santiago (en adelante STPS) represente la operación de transporte público integrado y los viajes realizados por usuarios del sistema en el periodo punta mañana.

La complejidad de la definición está causada por el gran tamaño de la red, en la que se observan viajes de duración mayor a una hora. Además, la hora de inicio de los viajes puede variar espacialmente a lo largo del periodo, al igual que se espera ocurra con la carga de la red. Todo ello complejiza la definición de la hora de modelación, que finalmente será la que logre representar con mayor éxito los deseos de la contraparte técnica.

Para la definición de la hora de modelación se debe considerar la representación de las siguientes variables en el periodo punta mañana: Oferta del STPS, Tarifa del STPS, Velocidades STPS y Demanda. Como la oferta y la tarifa del STPS son constantes a lo largo del periodo punta mañana, la hora punta mañana se encuentra bien representada por una hora de modelación cualquiera.

Por su parte, las velocidades del STPS varían tanto espacial como temporalmente dentro del periodo punta mañana. Entendiendo que las velocidades son el resultado de la propia asignación de la demanda a la oferta, se representaron las velocidades asociadas a la hora de modelación que fue definida a partir de la propia demanda.

Considerando lo anteriormente expuesto, se define la hora de modelación como consecuencia del análisis de la demanda a partir de los viajes en la tabla TB9 proveniente de las transacciones bip! y de análisis complementarios.

Respecto a la demanda del STPS, una representación apropiada del periodo debe considerar al menos dos factores: el estrés que se genera en el sistema producto de la alta demanda de viajes y la estructura de la matriz de viajes que se observa en el periodo. Por la cantidad y detalle de información de viajes se utilizó la información de viajes proveniente de la tabla TB9.

La siguiente tabla describe las opciones exploradas en cuanto a distribución de viajes de la matriz OD. Para cada opción se explica la forma de obtener la matriz qué representa y además, como afecta la evasión en cada enfoque:

Tabla 3-1: Enfoques de obtención de matrices OD

	Forma de cálculo	Qué representa	Efecto evasión
Hora Inicio de Viaje	Suma de número de viajes según hora de inicio de viaje, en grupos de una hora. Este valor se calcula para n horas móviles con inicio en el instante t (media hora, cuarto de hora u otro). Se utiliza la matriz n con mayor número de viajes.	La hora en que inician más viajes en el sistema.	Evasión de primera etapa genera sesgo en la hora de inicio de viaje y estructura de la matriz.
Hora Fin de Viaje	Suma de número de viajes según hora de término de viaje, en grupos de una hora. Este valor se calcula para n horas móviles con inicio en el instante t (media hora, cuarto de hora u otro). Se utiliza la matriz n con mayor número de viajes.	La hora en que terminan más viajes en el sistema.	Evasión de última etapa genera sesgo en la hora de término de viaje y estructura de la matriz. En punta mañana x% de los viajes tiene como última etapa pagada el modo.
Hora Media de Viaje	Suma de número de viajes según hora de mitad de viaje, en grupos de una hora. Este valor se calcula para n horas móviles con inicio en el instante t (media hora, cuarto de hora u otro). Se utiliza la matriz n con mayor número de viajes.	La hora en que más usuarios se encuentran en medio del viaje.	Evasión de primera etapa/última genera sesgo en la hora media de viaje.
Hora Promedio con Factor	Se calcula factor de hora más cargada como la matriz de una hora con más viajes según hora de inicio de viaje, sobre el total de viajes de hora punta promedio. La matriz de modelación es una matriz promedio de hora punta amplificada por este factor.	Estructura de matriz es la matriz promedio de hora punta que considera todos los viajes del periodo punta, amplificada por el factor de hora más cargada de inicio.	Evasión afecta cálculo de hora más cargada.
Gente activa viajando	Se suma el número de viajeros activos (en cualquier punto del viaje entre la hora de inicio y fin). Este valor se calcula para n horas móviles con inicio en el instante t (media hora, cuarto de hora u otro). Se utiliza la matriz n que considera los viajes observados durante la hora más cargada del sistema.	Mirada de la hora en que mayor número de personas se encuentra viajando, independiente de la hora de inicio o fin de viaje.	Evasión de primera/última etapa genera sesgo en la hora de inicio/término de viaje lo que impacta en el cálculo de número de personas viajando.

Fuente: Elaboración propia

Además de la evasión, se observan otras características cualitativas que se deben considerar en el análisis y que tienen relación con la metodología de construcción de la TB9:

Tabla 3-2: Consideraciones de los enfoques de obtención de matrices OD

	Pros	Contras
Hora Inicio de Viaje	La hora de inicio de viaje es dato. Se cuenta con este dato para casi la totalidad de los viajes.	No considera los viajes que inician antes de la hora más cargada y que usan el sistema durante una parte o toda la hora de modelación.
Hora Fin de Viaje	Considerando que en punta mañana la concentración espacial y temporal de viajes es según destinos, esta opción captura el efecto.	La hora de término de viaje es una estimación. Se cuenta con este dato para el % de datos con estimación solamente. Este dato se encuentra afectado por cualquier sesgo de estimación espacial-temporal. No considera viajes que terminan después de la hora más cargada y que usan el sistema en parte o durante toda la hora de modelación.
Hora Media de Viaje	Dado que el tiempo de modelación es fijo (1 hora) se reduce el problema de omisión de viajes más extensos.	La hora media de viaje es una estimación. Se cuenta con este dato para el % de datos con estimación solamente. Este dato se encuentra afectado por cualquier sesgo de estimación espacial-temporal. No considera los viajes que tienen su hora media fuera de la hora de modelación, pero que usan el sistema durante parte (o toda) la hora de modelación.
Hora Promedio con Factor	La estructura de la matriz considera los viajes que inician durante toda la hora punta, incluyendo viajes de más de una hora de viaje. Se utiliza la misma estructura de matriz independiente del efecto de la evasión en el cálculo de hora más cargada.	El factor de hora más cargada se aplica a toda la matriz sin consideraciones espaciales. Se utiliza la misma estructura de matriz independiente del efecto de la evasión en el cálculo de hora más cargada.
Carga sistema	Considera a todos usuarios del sistema de transporte durante una hora, independiente de la hora de inicio o fin del viaje.	La hora de término de viaje es una estimación. Se cuenta con este dato para el % de datos con estimación solamente. Este dato se encuentra afectado por cualquier sesgo de estimación espacial-temporal. Retrasa la hora de inicio de viaje de aquellos que inician antes de la hora de modelación.

Fuente: Elaboración propia

Considerando la descripción de los enfoques, se obtienen las matrices de cada uno de ellos. La siguiente tabla resume la metodología de obtención de matrices con cada enfoque, la hora de modelación correspondiente al enfoque, los viajes con estimación de bajada contenidos por cada matriz, los viajes expandidos contenidos por cada matriz y el porcentaje de expansión asociado al enfoque:

Tabla 3-3: Resumen de matrices OD por enfoque

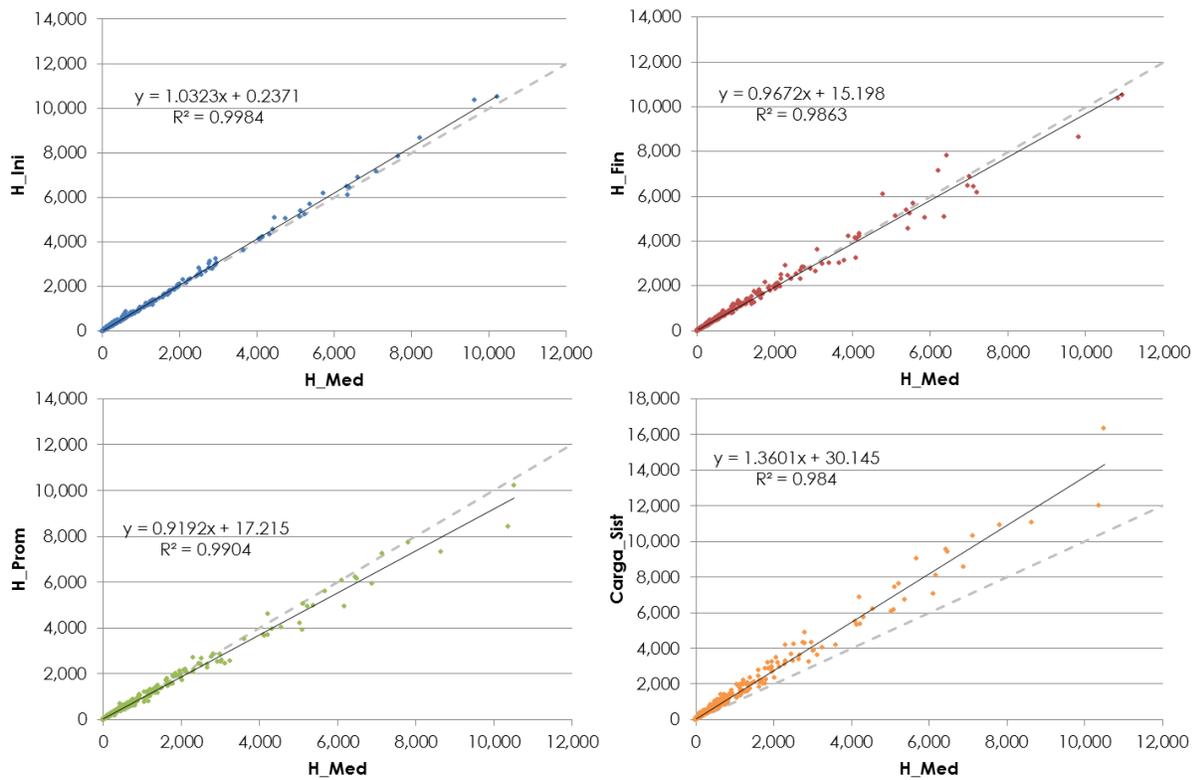
Nombre	Metodología	Hora mayor demanda	Viajes estimados	Expansión	% Expansión
H_Ini	Matriz con más viajes por hora de subida de viaje	7:15-8:15	297.164	394.542	75,32%
H_Med	Matriz con más viajes por hora media de viajes	7:30-8:30	306.739	407.565	75,26%
H_Fin	Matriz con más viajes por hora de bajada de viaje	8:00-9:00	304.253	403.224	75,46%
H_Prom	Matriz promedio de viajes con hora de inicio entre 6:30 y 8:30, ponderada por factor de hora más cargada (1.149)	7:15-8:15	295.923	394.542	75,00%
Carga_Sist	Matriz con más viajes para cualquier hora de viaje	7:30-8:30	441.457	589.158	74,93%

Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la hora con más demanda de viajes va desde las 7:15-8:15 hasta las 8:00-9:00 dependiendo del enfoque. **El enfoque de hora media coincide con la hora más cargada de viajes del enfoque de carga del sistema de 7:30 a 8:30.** Aunque pareciera que el enfoque de hora de inicio coincide con el de hora promedio, esto es así por definición del enfoque de hora promedio. Para este enfoque se toma el total de viajes del periodo punta mañana (687.030), se obtiene una hora promedio de viajes (343.515) y se amplifica (factor 1,149) para alcanzar los viajes de la hora más cargada por hora de inicio (394.542). Si este enfoque se desarrollara para alguna de las otras formas de agregación, se observaría la coincidencia de hora respectiva al enfoque. Respecto al total de viajes expandidos (columna expansión), la metodología de carga del sistema es la que incorpora más viajes, alcanzando los 589.158 viajes. Recordar que esta metodología considera todos los viajes observados durante la hora de modelación descrita, sin condición respecto de la hora de inicio, medio o fin de viaje. El siguiente enfoque con más viajes es la agrupación por hora media, que alcanza los 407.565 viajes. Le siguen muy de cerca los enfoques por hora de fin y hora de inicio de viaje con 403.224 y 394.542 viajes, respectivamente. Respecto al enfoque de hora promedio, por definición contiene el mismo número de viajes de la hora más cargada según la agrupación por hora de inicio de viaje. Además, la tabla señala el número de viajes con estimación de bajada realizados en la hora de modelación (hora promedio con factor para el enfoque promedio). Finalmente, la columna % estimación muestra la relación entre las columnas viajes estimados y expansión, es decir, la relación entre viajes estimados y viajes representados por los viajes estimados. No existen mayores diferencias entre los enfoques en cuanto a este indicador agregado.

Respecto a la distribución de la demanda de cada enfoque, la siguiente figura compara viajes entre el enfoque de hora media y los otros 4 enfoques. En cada gráfica una observación (punto) representa el número de viajes en cada par OD de comunas observado en las matrices obtenidas, la línea punteada corresponde a la diagonal:

Figura 3-1: Comparación Viajes OD Comuna por enfoque respecto de hora media (sup-izq: Hora inicio; sup-der: Hora fin; inf-izq: Hora promedio; inf-der: Carga sistema)



Fuente: Elaboración propia

Como se observa, todos los enfoques presentan una correlación importante respecto del enfoque de hora media. Sin embargo, en términos absolutos, el enfoque de carga del sistema muestra proporcionalmente un mayor número de viajes.

Se debe señalar que el enfoque carga del sistema y hora promedio no pueden ser representados apropiadamente en el modelo EMME, en el sentido de que los viajes no se encuentran agregados por una característica temporal que tenga lugar simultáneamente en una hora. El mismo problema se observa si se ajusta ciertas zonas de una matriz.

Con estas consideraciones se puede señalar que la hora de modelación que logra captar más viajes simultáneos, sin restringir hora de inicio ni fin, y que presenta una alta correlación con la definición más común (según hora de inicio de viaje), es el enfoque de hora media de viaje.

4 ZONIFICACION

La tarea de zonificación consiste en la división de la ciudad con el objetivo de posibilitar la agrupación de los viajes en las zonas resultantes según su origen y destino. Esto conformará la matriz de viajes que será posteriormente asignada a la red y calibrada.

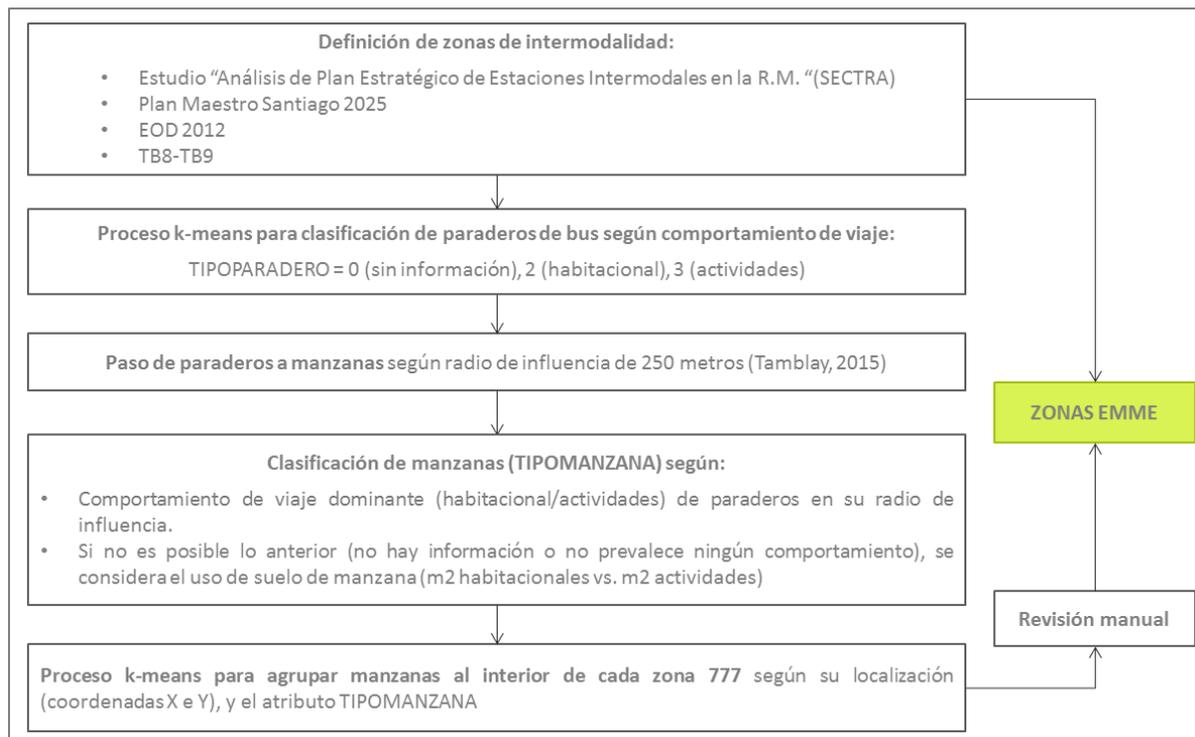
Dado el mencionado objetivo de agregación de viajes, es deseable que las zonas resultantes sean homogéneas en términos de la demanda de viajes, y por esta razón es deseable también que exista homogeneidad en el uso del suelo dentro de cada zona. Todo ello queda resuelto mediante una zonificación que agrupa las manzanas al interior de las zonas 777 mediante criterio de localización, uso de suelo y comportamiento de viaje. Además, este enfoque permite la estimación de viajes futuros en función de variables socio-demográficas, ya que esta zonificación respeta los límites comunales, está validada en concepto de uso de suelo y ha sido extensamente aplicada en modelos de transporte en la Región Metropolitana.

De acuerdo a las bases de licitación, el número de zonas máxima tiene como límite el de la licencia del software (3.000 zonas), con una holgura del 10%, por lo que resulta en un máximo de 2.700 zonas. El tamaño de las zonas es, por tanto, reducido y es por ello que el enfoque metodológico propuso hacer uso del máximo de información desagregada disponible que permitiese crear un criterio para generar zonas de tamaños caminables. En este sentido, las fuentes de información que toman parte en la metodología diseñada son las siguientes:

- Bases de licitación del estudio de Sectra "Análisis de Plan Estratégico de Estaciones Intermodales en la R.M."
- Plan Maestro Santiago 2025
- EOD Santiago 2012
- Tablas de etapas y viajes en modos bip! (TB8-TB9)
- Zonificación 777
- Información a nivel manzana de la Universidad Católica de Chile: datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y del Servicio de Impuestos Internos (SII)

Considerando lo anteriormente expuesto, a continuación se presenta el diagrama general de la metodología de zonificación. Posteriormente, se describe con detalle el paso a paso en la aplicación del proceso.

Figura 4-1: Diagrama de metodología de zonificación



Fuente Elaboración Propia

El proceso comienza con la definición de las zonas de intermodalidad, es decir, la identificación de los puntos más frecuentes de combinación intermodal y la selección de las manzanas que formarán parte de cada una de estas zonas.

Una vez definidas las zonas de intermodalidad, las manzanas aún sin zona asignada son agrupadas como resultado del proceso completo. Para ello en primer lugar se categorizan los paraderos en función del comportamiento de viaje observado en la tabla de viajes TB9, y después, considerando su radio de influencia y el uso de suelo, se categoriza cada manzana con el fin de agregarlas en zonas por criterios de cercanía y homogeneidad.

El comportamiento de viaje informa indirectamente del uso del suelo ya que los desplazamientos son una demanda derivada de ello. Este comportamiento puede obtenerse de manera desagregada a nivel de paradero de la TB9 y permite la caracterización de los paraderos a través del atributo TIPOPARADERO.

Tan solo la demanda de bus y no de metro o metrotren fue evaluada en este proceso por las siguientes razones:

- La influencia del bus es localizada, lo que permite tener certeza en la interpretación del comportamiento de la demanda.
- La demanda de metro se asume heterogénea en relación con la de bus, mientras que la demanda de este último modo tiene un carácter más rutinario y por tanto

permite asegurar la validez de la interpretación del uso de suelo del que deriva la demanda de viaje.

A partir de la categorización de los paraderos y considerando su radio de influencia es posible caracterizar las manzanas por medio del atributo TIPOMANZANA. Para ello se evalúa, por cada manzana, los paraderos bajo cuya influencia se localiza la manzana. Si existe un comportamiento de viaje dominante, entonces la manzana queda caracterizada por el comportamiento de viaje que prevalece entre los paraderos cercanos. De no estar bajo la influencia de ningún paradero de bus, no tener suficiente información del comportamiento de viaje en los paraderos cercanos o no dominar ningún comportamiento, entonces la manzana queda caracterizada por su uso de suelo más representativo, según sean más los metros cuadrados construidos para uso habitacional o la superficie dedicada al resto de usos.

Por último, las manzanas definidas por el atributo TIPOMANZANA y por su localización (coordenadas X e Y de su centroide), son agregadas espacialmente en un proceso de clustering que da lugar a la zonificación.

Como se indica en el diagrama de proceso, la metodología aplica dos procesos de clustering de tipo K-means. La técnica de clustering tiene como objetivo agrupar a los individuos en conglomerados de manera de maximizar la homogeneidad de los individuos dentro de los conglomerados mientras que a su vez se maximiza la heterogeneidad entre agregados distintos.

En cada proceso de clustering es necesario responder las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo medir la similitud entre las observaciones? Existen varias medidas de similitud para medir la distancia que existe entre los individuos y en este caso se ha optado por la medida de Disimilaridad Euclidiana, que es la más utilizada y se define como:

$$D_{ij} = \left(\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2 \right)^{1/2}$$

Donde D_{ij} es la distancia entre los individuos i y j , x las variables y p es el número de variables.

- ¿Cómo se forman los conglomerados? Para que cada cluster o agregado sea homogéneo se debe identificar la o las variables (x) a partir de las cuales se busca homogeneidad.
- ¿Cuántos grupos se forman? En el proceso de clustering K-means, el número de grupos o clusters es precisamente el parámetro k , que es fijo y es un input, decidido por el modelador.

El convencional algoritmo de K-Means se presenta a continuación:

Sea D un conjunto de datos con n instancias, y que C_1, C_2, \dots, C_k son los k grupos disjuntos de D . A continuación, la función de error se define como:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in c_i} d(x, \mu(c_i))$$

Donde $\mu(c_i)$ es el centroide del clúster c_i , y $d(x, \mu(c_i))$ designa a la distancia entre x y $\mu(c_i)$. La medida de distancia puede ser variada. La más utilizada es la distancia euclídeana.

Finalmente el algoritmo K-Means es el siguiente:

Requiere: Conjunto de datos D , número de Cluster k , d Dimensiones:

c_i es el i -ésimo cluster

1. Fase de inicialización

C_1, C_2, \dots, C_k = Inicial partición de D .

2. Fase Iteración

Repetir

d_{ij} = distancia entre el objeto i y el cluster j ;

$$n_i = \arg \min_{i \leq j \leq k} d_{ij}$$

Asignar objeto i y en el cluster j ;

Vuelve a calcular el valor representativo de los cluster (media);

Hasta que no haya cambios en los cluster en una iteración completa.

Salida de Resultados.

El algoritmo de K-Means puede dividirse en dos fases: la fase de inicialización y la fase de iteración. En la fase de inicialización, el algoritmo asigna de manera aleatoria los individuos en k clusters iniciales. En la fase de iteración, el algoritmo calcula la distancia entre los individuos y los conglomerados y asigna los individuos al cluster más cercano.

El algoritmo de clusterización es sensible a la asignación aleatoria inicial de individuos a clusters, pero este efecto se reduce al aumentar la cantidad de iteraciones en la segunda fase. En ella, el proceso itera hasta que encuentra el óptimo o valor mínimo posible de la diferencia media entre el centroide de cada cluster y cada uno de sus elementos (con el fin de obtener el cluster de mayor homogeneidad entre sus componentes). En consecuencia, el primer resultado es aleatorio y no es óptimo, y en cada iteración se evalúa la re-asignación de cada elemento y se verifica si ese cambio reduce las diferencias medias a los centroides. La solución óptima es aquella en que no es posible realizar ningún cambio de elementos en clusters que tenga como resultado una suma de diferencias promedio menor.

De lo anterior se deriva que existen dos razones por las que puede terminar el proceso: por llegar al número máximo de iteraciones, o por convergencia, es decir, obtener el valor óptimo en que las diferencias medias son mínimas. En la metodología de zonificación diseñada, en las dos aplicaciones del K-means se asegura que la solución se logra por convergencia, es decir, es la solución óptima que minimiza las diferencias y, por tanto, es independiente del punto de partida. Esto es así porque el número de clusters es reducido en todos los casos (máximo 4). Esto simplifica las opciones de agrupación de los elementos, por lo que no exige un alto número de iteraciones, mientras que, paralelamente, el número

máximo de iteraciones se ha establecido en 100, asegurando que es suficientemente alto para el caso de aplicación.

El proceso de clustering por K-means fue aplicado en dos fases de la metodología de zonificación. Las variables del proceso en cada caso son las siguientes:

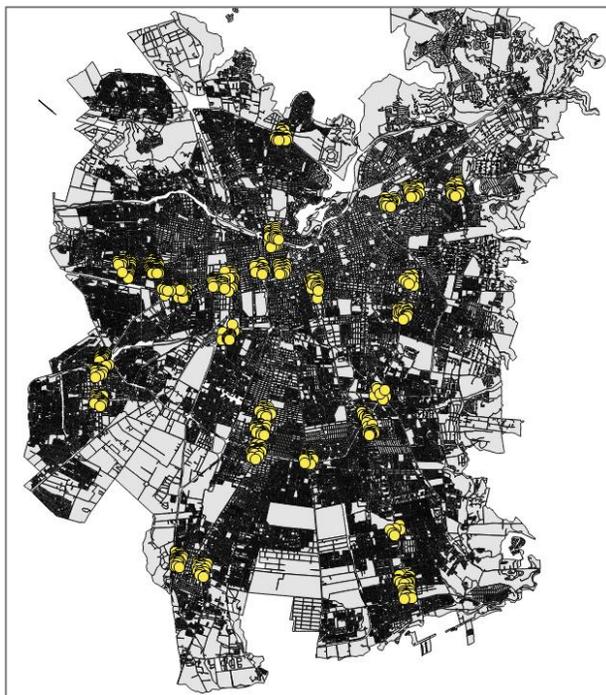
Tabla 4-1: Resumen de los dos procesos de K-means aplicados en la metodología de zonificación

Proceso	D	k	d
Clasificación de paraderos (Tipoparadero)	Todos los paraderos (bus) del sistema	4 (Inicio de servicios, Comp. Habitacional, Comp. Actividades, Fin de servicios)	Porcentaje de subidas respecto del total de viajes en el paradero en PMA, FPM y PTA
Agrupación de manzanas	Manzanas con Tipomanzana distinto de 0 dentro de una zona 777 cualquiera	2, 3 o 4 (según el número de manzanas de la zona)	Coordenadas X e Y, y Tipomanzana

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado se definieron las siguientes 32 zonas de intermodalidad que se presentan en la figura 4-2:

Figura 4-2: Manzanas que componen las zonas de intermodalidad



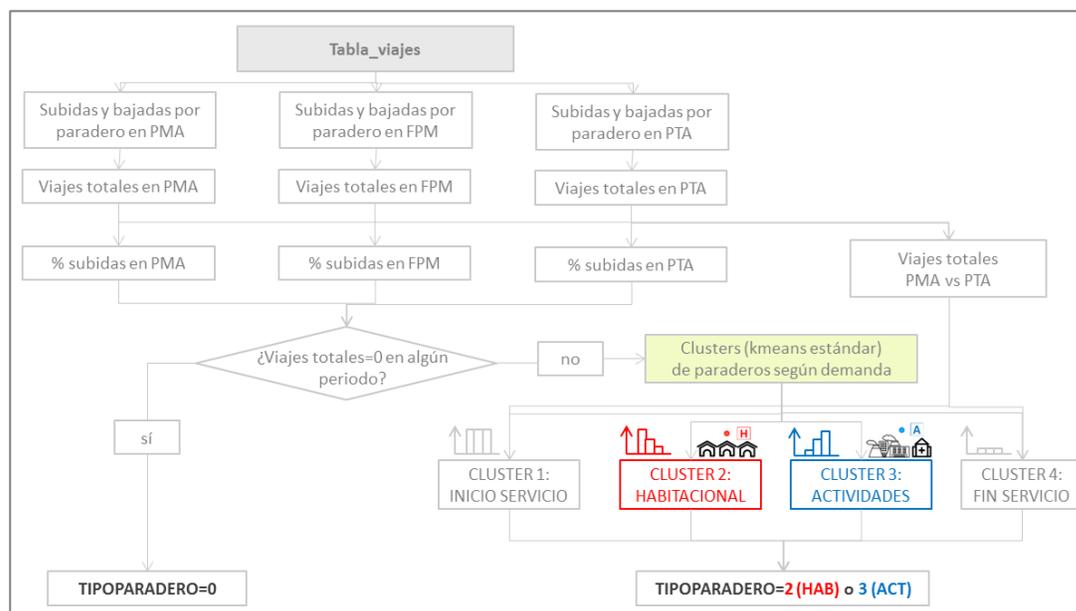
Fuente: Elaboración Propia

Una vez definidas las zonas de intermodalidad, se clasifican los paraderos de bus según su comportamiento de viaje para que, en una fase posterior, sean caracterizadas las manzanas según su uso de suelo y la influencia y comportamiento de los paraderos cercanos.

En el proceso de clasificación de paraderos intervienen todos los paraderos del sistema de bus con el fin de facilitar el automatizado del proceso y dada la posibilidad de que, aunque un paradero se localice dentro de una zona de intermodalidad, su radio de influencia involucre manzanas fuera de tales zonas, caso en que es necesario considerar el comportamiento de viaje en tal paradero.

El sub-proceso de clasificación de paraderos se describe a continuación.

Figura 4-3: Diagrama del proceso de clasificación de los paraderos de bus según su comportamiento de viaje



Fuente: Elaboración Propia

De la tabla de viajes en modos bip! (TB9) se extraen las subidas y bajadas por paradero de bus y periodo en los 3 periodos siguientes definidos por Transantiago:

- Punta Mañana (PMA): 6:30 a 8:29
- Fuera Punta Mañana (FPM): 9:30 a 12:29
- Punta Tarde (PTA): 17:30 a 20:29

Se consideran los anteriores 3 periodos con el fin de que la caracterización de los paraderos y, por tanto, la zonificación final sea robusta y válida no solo para los periodos punta.

Se obtiene el porcentaje de subidas en el paradero-periodo sobre el total de subidas y bajadas en tal paradero-periodo, según la siguiente fórmula:

$$\% \text{ subidas}_{\text{paradero-periodo}} = \frac{\sum \text{subidas}_{\text{paradero-periodo}}}{\sum \text{subidas}_{\text{paradero-periodo}} + \sum \text{bajadas}_{\text{paradero-periodo}}}$$

En consecuencia, cada paradero queda definido por 3 valores: porcentaje de subidas sobre el total de viajes en PMA, FPM y PTA. Definidos por este trinomio, los paraderos son

clasificados en clusters por el proceso k-means estándar que se describe a continuación y que tiene como objetivo identificar los patrones más relevantes en ese trinomio.

Como se dijo anteriormente, el número de clusters en que se desea clasificar la población (en este caso, población de paraderos) es un input al proceso. Se probaron diferentes valores y se concluyó que debía ser 4 ya que:

- Un número de clusters mayor a 4 es redundante en el sentido de que no se revelaban nuevos patrones de comportamiento sino que se desagregaba el patrón 2 (comportamiento de viaje habitacional) y el 3 (comportamiento de viaje por actividades) en clusters con la misma forma decreciente o creciente respectivamente, pero distintas magnitudes.
- Un número de clusters menor omite comportamientos o mezcla los comportamientos que por el contrario sí quedan definidos con un valor de 4 clusters.

Por lo tanto, del resultado del k-means se tienen los paraderos clasificados en los clusters 1 a 4. Los clusters 2 y 3 sí informan indirectamente del uso del suelo: el patrón de subidas en los 3 periodos del día es decreciente en el cluster 2 y creciente en el caso 3, lo que indirectamente revela un uso de suelo habitacional y de actividades respectivamente.

Por su parte, el comportamiento revelado por los clusters 1 y 4 es consecuencia de dos efectos: el uso de suelo y la oferta de transporte. En este sentido se tiene que el patrón de comportamiento de viaje revelado por el cluster 1 es el que se observa en paraderos cercanos al inicio de servicios, ya que un porcentaje muy alto de viajes son subidas, es decir, se originan en ese paradero. Por el contrario el cluster 4 lo conforman paraderos cercanos al fin de servicios, ya que un porcentaje reducido sube mientras que la mayoría son bajadas.

Es necesario obtener más información de viaje de cada paradero de estos clusters 1 y 4 de manera que puedan eventualmente asignarse a un uso de suelo predominantemente habitacional (cluster 2) o de actividades (cluster 3). Esta re-clasificación de paraderos se realiza a partir del propio cluster (1 o 4), y de la comparación entre el volumen total de viajes en el paradero en PMA y en PTA. La re-asignación queda de la siguiente manera:

Tabla 4-2: Re-clasificación de paraderos de los clusters 1 y 4 a los clusters 2 y 3

	Inicio de servicio (Cluster 1)	Fin de servicio (Cluster 4)
Viajes PMA > Viajes PTA	Hogar → Cluster 2	Actividades → Cluster 3
Viajes PMA < Viajes PTA	Actividades → Cluster 3	Hogar → Cluster 2

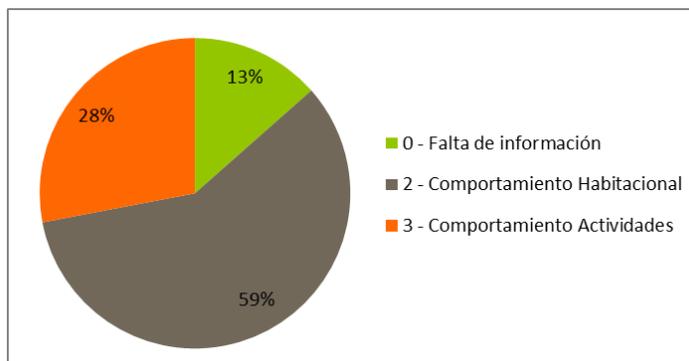
Fuente: Elaboración Propia

De esta manera, del proceso k-means y la re-asignación posterior se tienen los paraderos caracterizados por su atributo TIOPARADERO que toma el valor del cluster (2 o 3).

Además, como se muestra en el diagrama, si algún paradero no aparece en la TB9 en algún periodo, entonces no podrá ser caracterizado por falta de información (no se observaron subidas ni bajadas en ese/esos periodo/s). Estos paraderos son los primeros en identificarse cuando se extrae la información de la tabla de viajes TB9. Su atributo TIOPARADERO es 0 y no son considerados en el proceso k-means.

A continuación se analiza el resultado de la clasificación de los paraderos.

Figura 4-4: Clasificación de los paraderos de bus (atributo TIPOPARADERO)

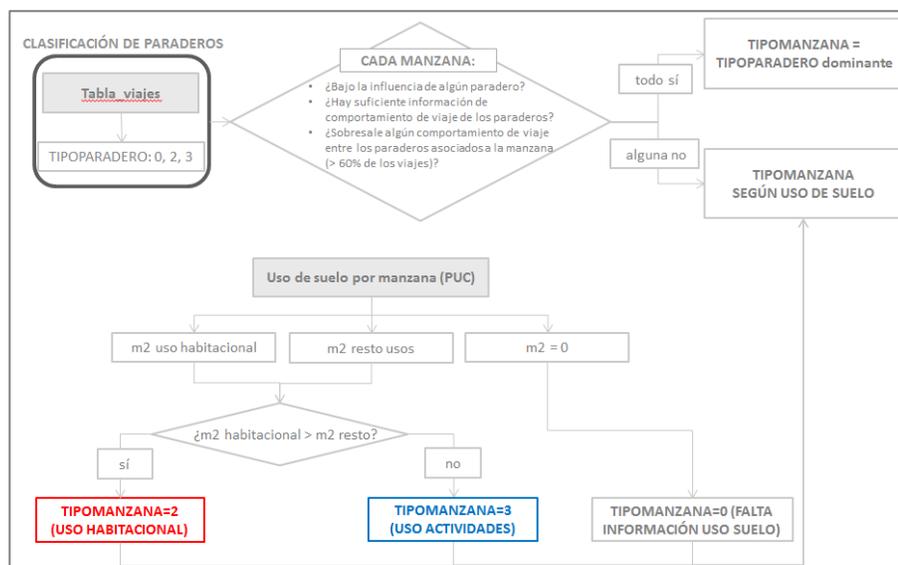


Fuente: Elaboración Propia

Como es de esperar, el comportamiento de viaje en la mayoría de paraderos (59%) es de tipo habitacional.

Una vez clasificados los paraderos en TIPOPARADERO igual a 0, 2 o 3, esta información se lleva a las manzanas en su radio de influencia de 250 metros (Tamblay, 2015) mediante el procedimiento que se esquematiza en el diagrama siguiente:

Figura 4-5: Diagrama del proceso de caracterización de las manzanas según el comportamiento de viaje o uso de suelo



Fuente: Elaboración Propia

En el paso de paradero a manzana y con el fin de caracterizar éstas a través del atributo TIPOMANZANA, se evalúan los paraderos bajo cuya influencia están dichas manzanas. Si existe un comportamiento de viaje dominante, entonces la manzana queda caracterizada por el comportamiento de viaje que prevalece entre los paraderos cercanos. Para ello se identifica el TIPOPARADERO y el volumen total de viajes en los 3 periodos de cada paradero bajo cuya influencia se sitúa la manzana. Considerando el total de viajes (subidas y bajadas

en los 3 periodos) que suman todos los paraderos asociados a una manzana, si los viajes asociados a un TIPOPARADERO igual a 2 o a 3 es mayor al 60% del total de los viajes de esos paraderos, entonces TIPOMANZANA= 2 o 3, según sea el caso. Se ha de notar que en el paso de paradero a manzana se consideran todos los viajes (subidas y bajadas) del paradero en los 3 periodos definidos y la influencia de un paradero en una manzana no varía con la distancia sino que se asumen todos los viajes involucrados y el mismo comportamiento de viaje en todas las manzanas en el radio de influencia del paradero (250 metros), lo que significa que para definir cada manzana en el radio de influencia del paradero se consideran todos los viajes observados en éste.

En el caso de que la manzana no esté bajo la influencia de ningún paradero de bus, que no haya suficiente información del comportamiento de viaje en los paraderos cercanos o no domine ningún comportamiento (ningún TIPOPARADERO acumula más del 60% de los viajes), entonces la manzana queda caracterizada por su uso de suelo más representativo. En estos casos se evalúa si son más los metros cuadrados construidos para uso habitacional (caso en que TIPOMANZANA = 2, uso habitacional) o la superficie dedicada al resto de usos: comercio, educación, industria, salud u otros (caso en que TIPOMANZANA = 3, uso actividades).

También en este caso existen manzanas de las cuales no se tiene información o la superficie construida es nula. Se pueden distinguir 3 casos en los que la superficie construida de una manzana es 0:

- No información
- Parque/cerro
- Sitio eriazo

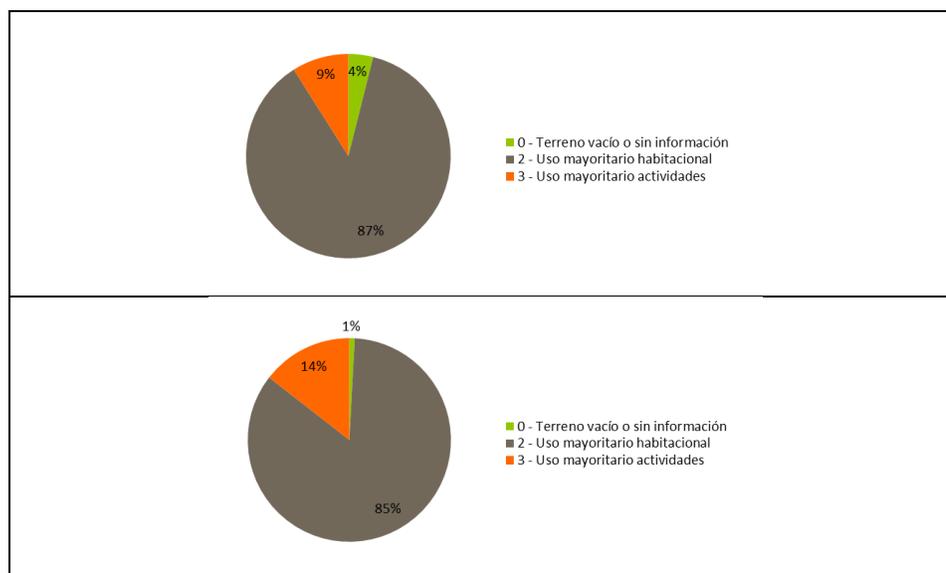
En el primer caso, podría ser que haya actividad en esa manzana pero los datos no estén suficientemente actualizados. En el segundo caso se esperaría generación/atracción según el periodo del día, sea característico al lugar, lo que se traduce en un comportamiento de viaje diferente que en otros usos de suelo. En el tercer caso la manzana no generaría ni atraería viajes.

A consecuencia de lo anterior, existen manzanas cuyo valor de superficie construida en la base de datos es 0, pero en estricto rigor se trata de una falta de información de uso de suelo ya que dados los 3 casos no siempre es cierto que no hay uso de suelo y que no se generan ni atraen viajes. Además, existen paraderos en cuyo radio de influencia ninguna manzana tiene información de uso de suelo y sin embargo se observan viajes. Debido a ambas razones se asume que el atributo TIPOMANZANA puede absorber el comportamiento de viaje dominante (en caso de haberlo) de los paraderos cercanos en las manzanas sin información de uso de suelo.

Por otro lado, existen casos de paraderos de bus en zonas 777 de la periferia, que no presentan manzanas. Se entiende que esto es debido a la antigüedad de la información de manzanas, pero se asume que si existe red de transporte público es porque existe demanda. Por lo tanto, para estos casos se creó una manzana por cada paradero y el valor del atributo TIPOMANZANA es directamente el de TIPOPARADERO.

Como resultado de todas las consideraciones anteriores, debajo se compara la clasificación de las manzanas a partir únicamente del uso del suelo con la clasificación derivada de la metodología en la que el atributo TIPOMANZANA proviene del TIPOPARADERO dominante o, en caso de no haberlo, del uso del suelo.

Figura 4-6: Clasificación de las manzanas (atributo TIPOMANZANA): a) a partir de datos de uso de suelo; b) resultado de la aplicación de la metodología: comportamiento de viaje dominante (TIPOPARADERO) y uso de suelo



Fuente: Elaboración Propia

Como se concluye de las dos gráficas, el resultado de la metodología optimiza el uso de la información disponible ya que permite reducir en gran medida las manzanas sin información de comportamiento o uso de suelo y, por otro lado, aumentan las manzanas que muestran un uso de suelo destinado a actividades. Esto es así dado que la metodología está reflejando la frecuente posibilidad de que aunque la superficie habitacional sea importante, en realidad en términos de volumen de viajes no lo es tanto, mientras que puede ocurrir que la superficie destinada a actividades sea reducida sin que ello genere o atraiga numerosos viajes.

Una vez realizado el proceso anterior, cada manzana queda definida por los siguientes atributos que son considerados en el proceso de clusterización:

- Zona 777 en el que se sitúa su centroide
- Coordenadas XY del centroide
- Tipomanzana= 0 (falta de información de uso de suelo), 2 o 3 según sea el uso principalmente habitacional o para actividades, según las definiciones anteriormente expuestas.

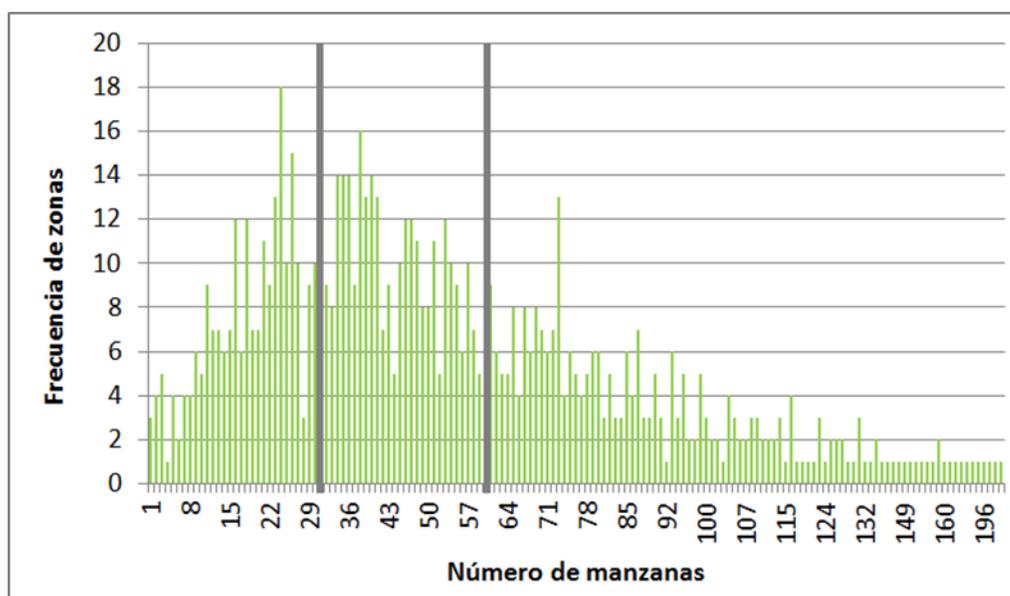
El proceso de clusterización realiza el algoritmo k-means (descrito anteriormente) entre las manzanas clasificadas con Tipomanzana 2 o 3 que pertenecen a una misma zona 777. Como consecuencia, las manzanas quedan agrupadas. El proceso busca que de manera simultánea en relación a los atributos X, Y y TIPOMANZANA, las manzanas que se agrupan en

un mismo clúster se parezcan lo más posible entre ellas y por el contrario se distingan lo más posible al resto de clústers que resulten. En consecuencia, el proceso asegura que las manzanas en un mismo clúster o zona final muestren un valor lo más similar en esos 3 atributos, pero, al igual que las coordenadas X e Y, serán cercanas y no coincidirán entre manzanas, también puede que TIPOMANZANA no coincida en todas las manzanas agrupadas.

Debido a la disparidad de tamaños de zonas 777, se define un número máximo de clusters (K máximo) por zona 777 a partir de los siguientes condicionantes:

- Se desea un máximo de 2.700 zonas ya que la licencia de Emme permite 3.000 y, tal y como se indica en las bases de licitación, se aseguraría una holgura del 10%.
- La cola de la gráfica de frecuencia de zonas 777 en función del número de manzanas se sitúa en un valor aproximado de 60 manzanas. En el proceso de clustering para la generación de las zonas finales, a las zonas 777 con más de 60 manzanas se les permite 4 clusters como máximo, un valor mayor que el del resto de zonas 777.

Figura 4-7: Frecuencia de zonas 777 según su número de manzanas



Fuente: Elaboración Propia

Dada la restricción del número total de zonas, se definió un valor de 4 clusters máximo para las zonas 777 con más de 60 manzanas y la definición aplicada fue la siguiente:

- Si la zona 777 se compone de menos de 30 manzanas (28%): máximo 2 clusters
- Si la zona 777 se compone de entre 30 a 60 manzanas (37%): máximo 3 clusters
- Si la zona 777 se compone de más de 60 manzanas (35%): máximo 4 clusters

Con todo lo dicho, el algoritmo realiza un proceso k-means dentro cada zona 777 con las manzanas con información de uso de suelo o comportamiento de viaje (tipomanzana de valor 2 o 3). En cada zona 777, el proceso prueba la convergencia con el valor máximo de

clusters definido para ella según su número de manzanas y, si no lo consigue, reduce el valor hasta lograrla. Los 3 atributos que entran en el algoritmo son la coordenada X, la coordenada Y, y el atributo tipomanzana. No se define una ponderación diferenciada entre ellos ya que si se aumenta el peso del atributo tipomanzana, las manzanas de un mismo cluster o zona pueden no resultar colindantes y ello impide la definición de las zonas en polígonos. Cuando los 3 atributos muestran el mismo peso, obviamente el atributo tipomanzana (la caracterización de la manzana según el comportamiento de viaje o el uso de suelo) está involucrado, pero a la vez se asegura que las manzanas son agregadas por cercanía y así es posible delimitar las zonas mediante polígonos.

Posteriormente a la generación de los clusters como agrupación de manzanas con tipomanzana de valor 2 o 3, al interior de cada zona 777 las manzanas con tipomanzana de valor 0 (sin información de uso de suelo ni comportamiento de viaje) son asignadas al clúster (zona) más cercano.

Una vez finalizado el proceso automático anterior, se revisa manualmente la zonificación resultante con el fin de asegurar que las zonas creadas tienen sentido en términos del dinamismo de la ciudad. En este sentido, concretamente se revisaron las zonas que estaban compuestas por menos de 5 manzanas. Éstas se mantuvieron o reasignaron en las zonas colindantes con el objetivo de lograr una coherencia territorial.

Por otro lado, se ha de mencionar que las barreras naturales están consideradas en el proceso debido a que la nueva zonificación se crea al interior de cada zona 777, cuyos límites están dispuestos sobre dicho tipo de barreras.

Del resultado automatizado se obtuvieron 2.461 zonas, las cuales se mantuvieron en número tras la revisión manual, es decir, únicamente se reasignaron manzanas a zonas. No obstante, previamente habían sido definidas 32 zonas de intermodalidad, lo que hacen un total de 2.493 zonas.

Una vez establecidas las manzanas en cada zona generada, los centroides de cada una se situarán en el centro de masas de la superficie total construida de la zona. Para ello el proceso es el que se describe a continuación. Se suma la superficie construida total por cada zona y para cada manzana de la zona se obtiene el porcentaje de superficie con que aporta al total de la zona. De forma separada, la coordenada X y la coordenada Y del centroide de zona es el promedio de las coordenadas respectivas de cada manzana, ponderado por el aporte de superficie construida de cada manzana respecto al total de la zona.

En caso de no disponer de información de uso de suelo en ninguna de las manzanas de la zona entonces su centroide se localiza en el centro de gravedad de los centroides de las manzanas involucradas.

De manera específica, en las zonas de intermodalidad, el centroide es la estación de metro o terminal de bus en caso de no haber estación de metro. No obstante, existen zonas intermodales especiales:

- Zona: Estación Central + Estación MetroTren Alameda + Terminal Buses San Borja. En este caso se ha tomado como centroide de zona el punto representativo de la estación MetroTren Alameda.
- Zona: Cal y Canto + Terminal Buses La Paz – Lastra. Para esta zona de intermodalidad, su centroide se ha definido en el punto representativo de la estación de Metro Cal y Canto, debido a su importancia en volumen de viajes respecto del Terminal de buses.
- Zona de Terminal de Buses de Tarapacá – San Francisco. Para localizar el centroide se ha tomado el paradero de bus contiguo (T-20-201-NS-7), que fue el que se tomó también en referencia para la delimitación de la zona.
- Zona de Terminal de Buses de San Bernardo. Se ha tomado como centroide el propio terminal.

Para la creación de los arcos de acceso, se procedió a dar acceso desde cada centroide de zona al punto más cercano de la red vial de modelación, ya que el software permite que los usuarios caminen por la red y accedan por ella al paradero que optimice su viaje según su localización, la oferta y las condiciones de red. Además, esta opción tiene la ventaja de no estar condicionada por la oferta de transporte, es decir, que no depende de la localización de los paraderos, por lo que si se desean agregar o sustraer paraderos no es necesario crear o eliminar arcos de acceso. El costo de acceso definido es la longitud del propio arco, es decir, entre el centroide de la zona y el punto más cercano de la red al cual se ha conectado.

5 ESTIMACION DE LA MATRIZ DE VIAJES

El objetivo de esta tarea es estimar una matriz de viajes que permita representar de la mejor forma posible la demanda real y comportamiento de los usuarios del STPS en el periodo Punta Mañana en la situación de calibración.

El objetivo de la construcción de la matriz OD es representar la estructura de viajes del periodo Punta Mañana, en su hora más cargada. De acuerdo al objetivo planteado, el criterio recomendado para la elección de la hora de modelación es la hora más cargada de viajes según hora media de viaje, en un día laboral normal promedio, la cual se observa entre 7:30 a 8:30.

Esta hora de modelación responde al objetivo planteado de un enfoque estratégico, más que de simulación.

La estimación de la matriz OD se compone de 4 procesos y todos ellos se basan en la Tabla de Viajes, a la cual se le aplica transformaciones de estructura y/o factores de corrección según indique la información adicional. Los procesos aplicados son:

- Obtención de matriz de bips!,
- Incorporación de evasión parcial (también denominada evasión blanda),
- Incorporación de evasión sistemática (o evasión dura)
- Incorporación de boletos Edmonson.

La metodología de cada uno de estos procesos se explica en los siguientes puntos y se aplica de manera independiente, para revisar el impacto de cada proceso sobre la matriz obtenida de la tabla de viajes TB9. La matriz OD de punta mañana se obtiene de la suma de las modificaciones o matrices generadas en cada paso.

Es preciso notar que, a pesar de que la metodología también hace uso de la información disponible de comportamiento de viaje en paraderos, la zonificación se realiza como agrupación de manzanas al interior de cada zona 777. En consecuencia, las proyecciones de demanda se realizan de la manera tradicional ya que la propia zonificación 777 respeta los límites comunales y está validada en términos de uso de suelo.

Considerar que este procedimiento se desarrolló con los datos entregados por el mandante en primera instancia correspondiente a una semana de mayo del 2016 y posteriormente se repite su aplicación en la tabla de viajes correspondiente a una semana de agosto del 2017, mes en el que se realizan las mediciones de tasas de ocupación de buses, para la calibración de la matriz de demanda en el modelo de asignación de transporte público. Las tablas de etapas y viajes de mayo 2016 se reemplazan con datos del 31 de julio al 4 de agosto 2017. Esta tabla se obtiene de la versión de ADATRAP que estima bajada a nivel de día.

A continuación se presentan los resultados utilizando como información base la tabla de agosto 2017.

Considerando que cada uno de los procesos aplicados se realiza de forma independiente y sobre la matriz OD base PM, para incorporar todos los procesos se suma la diferencia de viajes producida en la aplicación de cada factor sobre el factor de expansión original de cada viaje proveniente de la tabla TB9, es decir:

$$V_{ij} = V_{ij_Base} + \Delta Evasi\acute{o}n_Parcial + \Delta Evasi\acute{o}n_Sistem\acute{a}tica + \Delta Boletos_Edmonson$$

La agregaci3n de todos los procesos genera una nueva matriz OD de viajes de PM. Si se comparara la diferencia de viajes generados y atraídos a nivel de zona, entre la matriz actualizada y la matriz base, se obtienen diferencias de viajes por zona, como se muestra en la siguiente tabla:

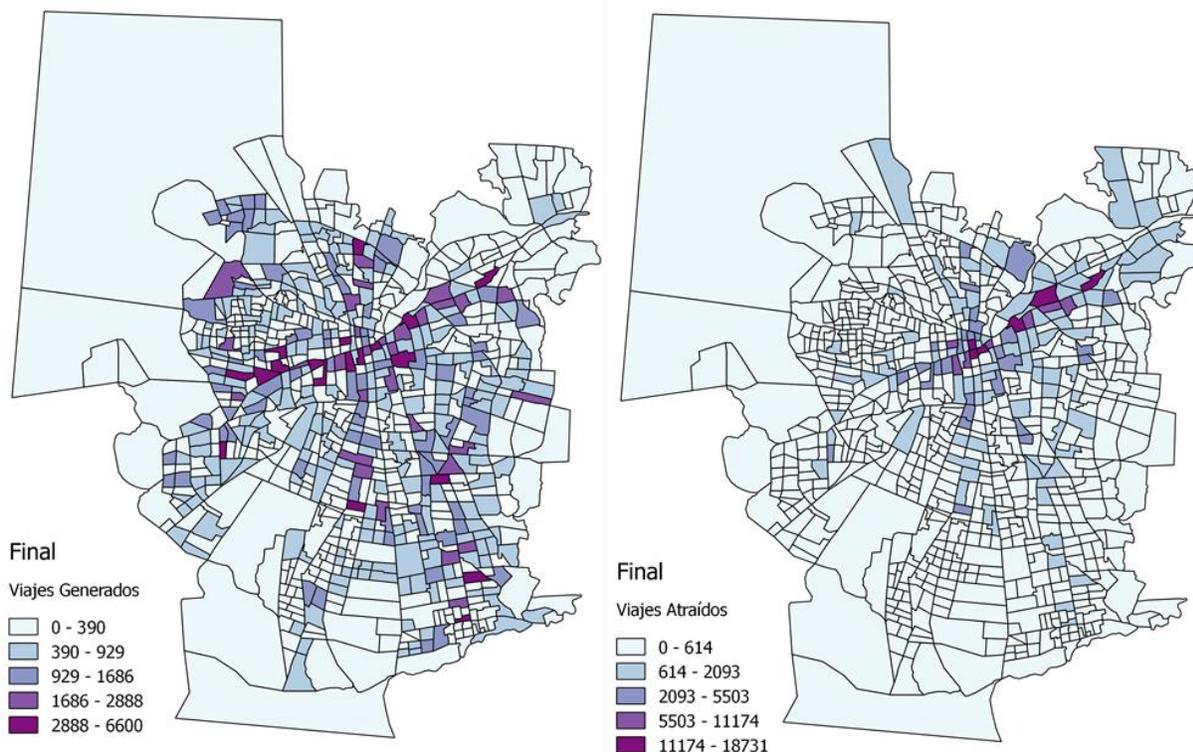
Tabla 5-1: Detalle de variaci3n de viajes por incorporaci3n de evasi3n parcial, sistemática y boletos Edmonson

Matriz	Comentario	Viajes adicionales	Total viajes matriz
Matriz hora más cargada	de 7:30-8:30	-	377.235
Matriz Base	correcci3n por zona	13.875	391.110
Matriz Ev. Parcial	correcci3n de estructura, no incorpora viajes	0	391.110
Matriz Ev. Sistemática	correcci3n r/ matriz base	58.300	449.410
Matriz Edmonson	correcci3n r/ matriz base	10.835	401.944
Matriz Actualizada	correcci3n r/ matriz base, se calcula como suma de correcciones por zona	69.135	460.245

Fuente: Elaboraci3n Propia

La siguiente figura muestra los viajes generados y atraídos en la matriz OD punta mañana actualizada a nivel de zona 777:

Figura 5-1: Generación (izq) y atracción (der) de viajes a nivel de zona 777, matriz OD PM actualizada



Fuente: Elaboración Propia

La matriz actualizada presenta una tasa de 1.48 etapas por viaje.

Al contar con la matriz actualizada a nivel de viaje, es posible analizar su composición en este mismo nivel de detalle. Es posible obtener la cantidad de etapas por operador, contabilizadas hasta la 4ta etapa de viaje (Datos Observados) y compararla con las etapas de los datos previos a la intervención por evasión (Datos Bips), obteniendo evasión por Unidad de Negocio y comparándola con la Evasión reportada por el Ministerio del segundo trimestre del año 2017. La tabla 5-2 presenta un resumen de lo anterior.

Tabla 5-2: Detalle de matriz actualizada, número de etapas de viaje por operador

UN	Datos Bips	Datos Observados	Evasión Matriz	Evasión Ministerio 2Trimestre 2017
U1	34.232	46.416	26%	42%
U2	53.148	70.136	24%	28%
U3	54.350	73.731	26%	35%
U4	51.707	65.762	21%	24%
U5	54.895	70.585	22%	34%
U6	31.773	39.729	20%	9%
U7	21.343	27.498	22%	35%
TOTAL BUS	305.077	398.481	23%	30%
Sin Unidad	3.629	4.624	22%	
Metro	265.159	275.993	4%	
Metrotren	4.899	4.898	0%	
Total Etapas	575.135	679.372	15%	
Etapas Viaje		1,48		
Viajes Caminata		0		

Fuente: Elaboración Propia

La evasión introducida por Unidad de Negocio es sistemáticamente menor que la reportada por el Ministerio, con excepción de la UN6.

En la misma línea, también es posible calcular los transbordos observados entre tipos de transporte, lo que se reporta en la tabla 5-3.

Tabla 5-3: Transbordos entre combinaciones de tipo de transporte

Etapa N	Etapa N+1	Transbordos
Bus+ZP	Bus+ZP	59.327
Bus+ZP	METRO	117.261
Bus+ZP	METROTREN	957
METRO	Bus+ZP	37.459
METRO	METROTREN	239
METROTREN	Bus+ZP	539
METROTREN	METRO	3.345
Total		219.126

Fuente: Elaboración Propia

Otra dimensión de análisis son los niveles de servicios por componente de tiempo de viaje para la matriz actualizada (tabla 5-4).

Tabla 5-4: Nivel de Servicio, matriz OD Punta Mañana

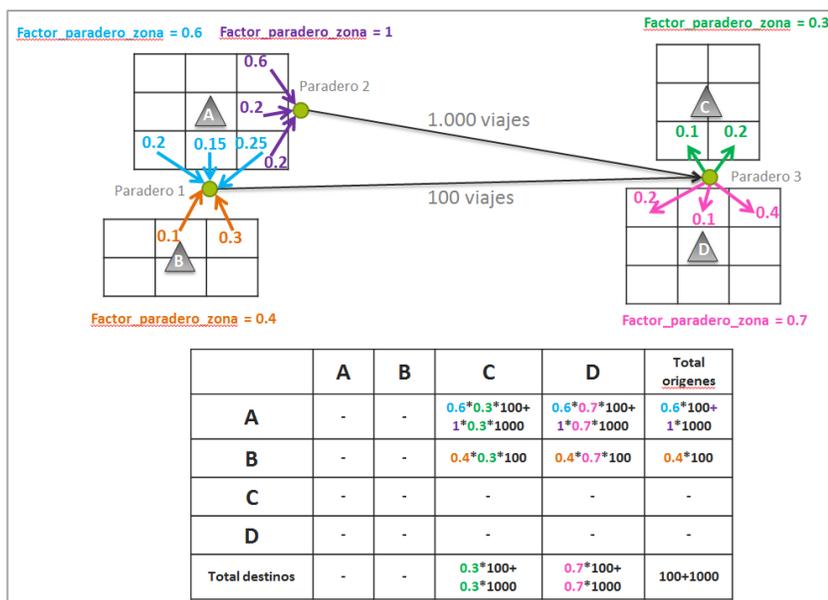
	Tiempos (Minutos)
Tiempo Caminata	0,57
Tiempo Espera	1,15
Tiempo vehículo	35,5
Tiempo de Viaje	37,21

Fuente: Elaboración Propia

Cabe mencionar que el tiempo de caminata solo considera las caminatas en los transbordos, pues la información de ADATRAP no contiene el acceso y egreso del viaje, por lo que el valor esta intrínsecamente subestimado. Por otra parte, el valor del tiempo de espera también está subestimado, pues solo considera la espera en el transbordo, no incorporando la espera de la primera etapa.

Una vez generadas las matrices a nivel de parada, fue construida la matriz a nivel zonal considerando la nueva zonificación. El proceso para ello se esquematiza en la siguiente figura:

Figura 5-2: Ejemplo esquemático de generación de la matriz de viajes a nivel zonal



Fuente: Elaboración Propia

En el ejemplo, del paradero 1 salen 100 viajes al paradero 3 y del 2 salen 1.000 al 3. En el radio de influencia del paradero 1 se localizan 5 manzanas: 3 de ellas pertenecen a la zona A y 2 a la zona B. En el radio de influencia del paradero 2 están 3 manzanas y las 3 pertenecen a la misma zona A. En el radio de influencia del paradero 3 se tienen 5 manzanas: 2 pertenecen a la zona C y 3 a la D.

El reparto de los viajes del paradero se realiza entre las manzanas en su radio de influencias según las siguientes dos componentes:

- Distancia: Inversamente proporcional a la distancia en red entre el paradero y el centroide de la manzana
- Superficie construida: Directamente proporcional a la superficie construida total de la manzana

Para cada combinación paradero-manzana, se asume que los viajes se reparten entre las manzanas en el radio de influencia según la suma de la proporción que cada manzana aporte al total en distancia más en superficie. Posteriormente, conociendo las manzanas de cada zona, se obtiene un factor paradero-zona, que es la suma de los factores paradero-manzana de las manzanas en esa zona en el radio de influencia de tal paradero.

Los radios de influencia considerados son los definidos por Tamblay (2015) a partir de una encuesta origen destino en paraderos y estaciones, y resultantes para el 95% de los viajes observados en ella: 250 metros para bus y 750 metros para metro (misma consideración para metrotren).

Por cada par OD de paraderos, los viajes se reparten entre todas las combinaciones de zonas que contienen al menos una manzana en el radio de influencia del paradero origen o destino, según la siguiente fórmula:

$$Viajes_{zona0-zonaD} = viajes_{paradero0-paraderoD} * factor_{paradero0-zona0} * factor_{paraderoD-zonaD}$$

Existen 2.700 manzanas que están dentro de los límites de las zonas 777 pero que no están bajo el radio de influencia de ningún paradero o estación. No obstante, si en el futuro la cobertura de la red alcanzara a dichas manzanas, éstas podrían generar y/o atraer viajes. En base a este aspecto se probaron dos hipótesis:

- a) Asumir que si hay manzanas, hay demanda potencial: bajo esta hipótesis, estas manzanas se conectan al paradero más cercano, permitiendo la generación/atracción de una demanda que con la red actual es reducida dada la lejanía al paradero y el reparto inversamente proporcional a la distancia.
- b) Asumir que la demanda observada en la red bip! está generada/atraída tan solo en su radio de influencia: bajo esta hipótesis las manzanas fuera del radio de influencia de la red no toman parte en la asignación de demanda de nivel paradero a nivel zonal, es decir, no generan ni atraen demanda.

La metodología anterior de reparto de viajes observados desde nivel paradero a nivel zonal, pasando por el nivel manzana, busca considerar de manera robusta el origen y destinos reales, es decir, la atracción y generación de cada zona.

6 CONSTRUCCIÓN MODELO DE ASIGNACIÓN PUNTA MAÑANA

La construcción del Modelo de Asignación se compone por los siguientes elementos:

- Definición de Modos
- Definición de tipos de vehículos
- Definición de arcos y nodos
 - Red vial/Metro/Metrotren
- Definición de zonas
- Definición de conectores
 - Zonas/Entre modos
- Definición de la matriz de viajes
- Definición de itinerarios servicios
 - Buses/Metro/Metrotren
- Definición de velocidades
 - Buses/Metro/Metro tren
- Definición de Características Operacionales servicios buses, Metro y Metro tren
 - Frecuencia/Índice de Cumplimiento de Frecuencia/Capacidad
- Definición de Parámetros de Modelación
- Definición Esquema Tarifario

A modo de resumen, el modelo construido se compone de la siguiente información:

Figura 6-1: Resumen Información Modelo de asignación



Fuente: Elaboración Propia

La función objetivo de costo generalizado del modelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$F.O = \sum_{etapa\ i=1}^n \frac{tarifa_i^{modo}}{VST} + a_{viaje} * t_{viaje}^i + \alpha_{espera} * t_{espera}^i + \alpha_{caminata} * t_{caminata}^i + a_{penal.trasb,i}^{modo}$$

Donde $a_{penal.trasb,i}^{modo}$ es la penalidad por transbordo que depende del modo y la etapa en que se encuentre el viaje. Dicho valor es nulo la primera etapa del viaje y aditiva al tiempo cada vez que se realiza una siguiente etapa.

Por su parte, el tiempo de espera será una BPR la forma funcional del tiempo de espera utilizada es la que sigue:

$$BPR\ t.\ espera_{modo} = \alpha_{modo} * \left(\frac{subidas + flujo\ en\ el\ arco}{cap} \right)^{\beta_{modo}} + 1$$

Donde:

$$cap = 60.0 * 2 * \frac{tot_cap}{head}$$

$tot_cap = capacidad\ total\ del\ veh\iculo$

$head = headway$

Luego:

$$headway_percibido = Min\{999.0, Max\{1.0, BPR\ t.\ espera_{modo}\} * intervalo_segmento\}$$

Así, los parámetros del modelo para comenzar el proceso de calibración se obtuvieron a partir de experiencias anteriores. Primeramente, se utilizaron los parámetros del modelo desarrollado para el año 2011 y fueron ajustados en la medida que se requiera replicar de mejor manera las etapas subyacentes de la matriz a asignar. Así, los parámetros de asignación con que se inició la asignación de modelo fueron los siguientes:

Tabla 6-1: Parámetros de asignación

Definición de Parámetros	Valor
Valor del Tiempo (\$/min)	0.08*
Peso del Tiempo de Espera	2
Peso del Tiempo de Caminata	2
Peso del Tiempo de viaje	1
α (BPR función de hacinamiento us1)	2
β (BPR función de hacinamiento us1)	4
α (Intervalo de Espera – Modo Bus)	5
β (Intervalo de Espera – Modo Bus)	1,5
α (Intervalo de Espera – Modo Metro)	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metro)	2
α (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	2
Penalidad por Transbordo Metro	2
Penalidad por Transbordo Metrotren	2
Penalidad por Transbordo Bus	5

Fuente: Modelo EMME @ DTPM 2011. *Actualizado a pesos 2016

Por último, no son pocos los estudios dedicados a entender y modelar el tiempo de espera en paraderos, junto con la forma en que llegan los usuarios a la parada y el mecanismo de servicio. De dichos estudios generalmente se concluye, para situaciones de tráfico mixto, que (i) las llegadas de usuarios a los distintos paraderos pueden ser modeladas razonablemente como un proceso de Poisson, esto es, los tiempos entre las llegadas de los usuarios siguen leyes exponenciales (proceso de arribo de Markov); y (ii) la obtención de distribuciones exponenciales o normales para los intervalos de arribo de los buses cuando la parada se aleja del punto de inicio del servicio.

Luego, es posible demostrar que bajo dichas condiciones el valor esperado del tiempo de espera a un servicio es equivalente a $1/f$, cifra que ya es superior a $1/2f$. En consecuencia, independiente de la forma funcional que busque representar el fenómeno de la congestión en los tiempos de espera, dicho valor debería ser superior a $1/2f$.

Finalmente, respecto a la forma funcional para representar el deterioro de los tiempos de espera, Beltrán (2012)¹ provee no solo un marco teórico riguroso, sino que además prueba una serie de formas funcionales demostrando que funciones no lineales logran un mejor nivel de representación. De este modo, la utilización de BPR para los tiempos de espera tiene una justificación técnica, y los parámetros alpha y beta son materia de calibración y ad-hoc al sistema que se esté representando.

La estructura tarifaria del sistema corresponde a la tarificación integrada entre bus, metro y metrotren, donde los usuarios realizan un pago inicial al ingresar al primer servicio del sistema y si la estrategia requiere de más de una etapa de viaje, se debe pagar una tarifa de transbordo dependiendo del modo que se utilice.

¹ [Congestión y Equilibrio en Redes de Transporte Público. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Transporte](#)

Para el período de Punta Mañana se tiene la siguiente estructura tarifaria para el sistema actual.

Tabla 6-2: Estructura Tarifaria Mayo 2017

Número de etapa	Modo	Modo Etapa Anterior	Tarifa
1	Bus	-	640
1	Metro	-	740
1	Metrotren	-	740
2 o 3	Bus	Bus	0
2 o 3	Bus	Metro	0
2 o 3	Bus	Metrotren	0
2 o 3	Metro	Bus	100
2 o más	Metro	Metro	0
2 o 3	Metro	Metrotren	0
2 o 3	Metrotren	Bus	100
2 o 3	Metrotren	Metro	0
2 o más	Metrotren	Metrotren	0

Fuente: Elaboración Propia

Para poder representar la tarifa del modelo actual de STPS, EMME® dispone del módulo **Journey Level Tool** que permite definir un sistema tarifario integrado basado en la estrategia que realice un usuario, disponible en la herramienta de asignación de tránsito.

Esta herramienta define niveles de viaje, donde se especificaron las siguientes condiciones.

- Reglas de transición: Determina a que nivel de viaje los viajeros estarán después de abordar un modo de transporte dado. Por ende, se van agregando todas las posibles formas de transbordos existentes en la red por modo.
- Tiempo y costo:
 - Tiempo de espera: Parámetros para los viajeros que abordan un nivel. (Headway, factor de percepción y factor de propagación)
 - Tiempo de abordaje y costo: Son parámetros para los viajeros que abordan un nivel (global o nodo, línea y/o penalidad de segmento y factor de percepción).

Es decir, en el modelo de asignación la tarifa o estructura tarifaria, que es parte de la función de costo o des-utilidad, es definida directamente en el método de asignación, definiendo los “niveles de viajes” (que pueden realizar los usuarios que ingresan al sistema). En cada uno de estos niveles de viaje se define la tarifa que paga el usuario según el modo que aborde y el nivel en el que se encuentre. Este módulo específico en la herramienta permite también definir tiempos de espera y abordaje.

Cabe destacar que no se considera una tarifa de estudiante, pues para ello se debiese incorporar un enfoque multiusuario de obtención de matrices y asignación, cuestión que no está dentro del alcance original del presente estudio.

A partir de la construcción antes detallada, se procedió a generar un Proyecto en EMME® incorporando todos los elementos antes descritos en un escenario de modelación. Dicho escenario será considerado como el **Escenario Base** y puede ser revisado en detalle en los Anexos del capítulo. Los resultados globales del Escenario se presentan a continuación:

- ✓ Matriz de viajes: 460.150
- ✓ Matriz de viajes asignada: 458.607
- ✓ Viajes intrazonales: 1.543
- ✓ Viajes sólo a pie: 49.824

Tabla 6-3: Etapas Escenario Base por UN

UN	Datos Observados	Etapas Escenario Base	Variación Porcentual
U1	46.416	65.284	40,6%
U2	70.136	114.163	62,8%
U3	73.731	90.595	22,9%
U4	65.762	100.197	52,4%
U5	70.585	93.333	32,2%
U6	39.729	45.262	13,9%
U7	27.498	34.621	25,9%
Sin UN	4.624	0	-100,0%
Metro	275.993	279.124	1,1%
Metrotren	4.898	6.536	33,4%
Total Etapas	679.372	829.116	22,0%
Viajes a pie		49.824	
Viajes Asignados TP	460.150	410.326	-10,8%
Etapas Viaje	1,48	2,03	36,9%

Fuente: Proyecto EMME® DTPM

Las etapas por viaje del escenario de modelación se construyen a partir de la división de las etapas de viaje, sin considerar los transbordos metro-metro, por el total de viajes asignados al sistema de transporte, es decir, sin considerar los viajes a pie ni los viajes intrazonales.

Se observa un alto valor del indicador de etapas por viaje del escenario, así como también una generalizada sobreestimación tanto en las etapas por viaje, como en las asociadas a cada Unidad de Negocio incluido Metro. También se observa un importante número de viajes que prefiere irse a pie en vez de tomar el sistema, en contraposición con lo que ocurre en la realidad, toda vez que la matriz fue construida sobre viajes observados de transporte público.

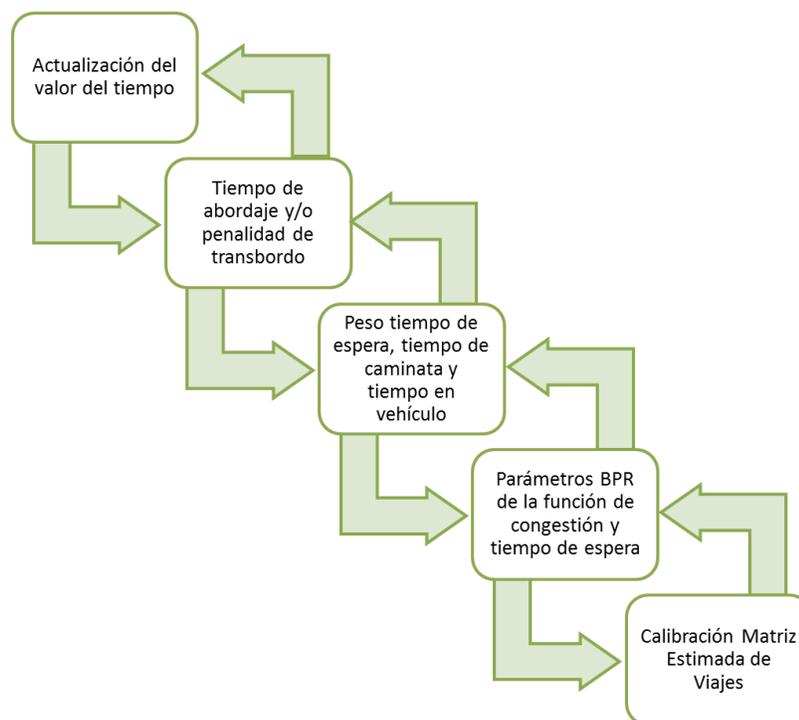
Al comparar el flujo de buses modelado respecto a un conjunto de aforos medidos para tal efecto se observa que el nivel de ajuste que presenta la matriz sin calibrar es 81,5%. Por su parte, si se compara la afluencia de metro (sin considerar los transbordos metro-metro) medida versus modelada el ajuste es de 82%.

Todo lo anterior, confirma la necesidad de ajustar los parámetros de asignación, previo al proceso de calibración de la matriz, cuestión que se reporta en detalle en el siguiente capítulo.

7 CALIBRACION MODELO DE ASIGNACIÓN PUNTA MAÑANA

De acuerdo a lo expuesto en la propuesta metodológica correspondiente al proceso de calibración del modelo, este proceso corresponde al de ajuste de uno o más elementos que componen la red de modelación tales como matriz de demanda, velocidades, valor del tiempo, parámetros de funciones BPR; con el fin de representar de la mejor forma posible el comportamiento de los usuarios de sistema de transporte público de Santiago. La siguiente figura muestra cómo se abordó el proceso de calibración del Modelo de Asignación. Dicho proceso se plantea por etapas y es iterativo.

Figura 7-1: Flujo Calibración del Modelo



Fuente: Elaboración propia

7.1 AJUSTE POR VALOR DEL TIEMPO

Al analizar la asignación de la matriz con los parámetros del Modelo del 2011, se observa un gran número de viajes que el modelo de asignación define como estrategia exclusivamente del modo caminata, pero de acuerdo a los datos registrados en la matriz a priori todos los viajes debieran resolverse utilizando al menos un servicio del sistema de transporte público modelado, por lo que queda en evidencia que el valor del tiempo de los usuarios utilizado en el modelo es “bajo”.

Por lo tanto, el Valor Subjetivo del Tiempo de los usuarios del sistema es el primer parámetro a modificar. El criterio para definir un nuevo valor para este parámetro, es que debe ser lo suficientemente alto, para que los usuarios no resuelvan su viaje sin utilizar transporte público. Para lo anterior, se evaluaron un set de valores escogiendo aquel que minimiza el total de viajes asignados a solo caminata sin aumentar significativamente el total de etapas bips de la asignación.

Tabla 7-1: Parámetros de asignación escenarios de modelación

Definición de Parámetros	Escenario Base	Escenario 2
Valor del Tiempo (min/\$)	0,08*	0,01714
Peso del Tiempo de Espera	2	2
Peso del Tiempo de Caminata	2	2
Peso del Tiempo de Abordaje	1	1
α (BPR función de hacinamiento)	2	2
β (BPR función de hacinamiento)	4	4
α (Intervalo de Espera – Modo Bus)	5	5
β (Intervalo de Espera – Modo Bus)	1,5	1,5
α (Intervalo de Espera – Modo Metro)	1,5	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metro)	2	2
α (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	1,5	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	2	2
Penalidad por Transbordo Metro	2	2
Penalidad por Transbordo Metrotren	2	2
Penalidad por Transbordo Bus	5	5

Fuente: Modelo EMME © DTPM 2011. *Actualizado a pesos 2016

El valor seleccionado fue de α 0.01714 min/\$ equivalente a 58\$/min.

A modo de comparación se revisaron otras modelaciones para comparar el valor del tiempo, encontrando una amplia gama de valores, los que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7-2: Comparativo de Valores Subjetivos del Tiempo diferentes Estudios

Estudio/Modelación	VST (\$/min)	Año
DIRTP	3,62	en pesos 2001
Modelo Emme 2011	12,5	en pesos 2011
Informe Final “Análisis del Valor Social del Tiempo de Viaje Urbano Diferenciado por Modo” Ciudad de Antofagasta Modo bus/propósito trabajo/punta mañana	31,37	en pesos 2011
Informe Final “Análisis del Valor Social del Tiempo de Viaje Urbano Diferenciado por Modo” Ciudad de Talca Modo bus/propósito trabajo/punta mañana	13,13	en pesos 2011

Fuente: Elaboración Propia a partir de estudios de la tabla

Se observa disparidad de valores según el modelo. Para los valores más recientemente calculados, se observa además que el valor es diferente para cada ciudad, probablemente debido a la diferencia de tamaño, PIB local y longitud de los viajes, por lo que no son homologables a Santiago. Es más, en rigor, en una modelación el valor subjetivo del tiempo es una variable que debe reflejar o inducir comportamiento general, en particular para el caso del Modelo de Transporte Público de Santiago, debe ser tal que la elección del modo

caminata sea mínima, dado que los viajes observados han usado transporte público, pero que no por minimizarla se generen efectos colaterales indeseables en los resultados.

Los resultados de etapas por Unidad de Negocio obtenidos a partir de esta modificación son:

Tabla 7-3: Resultados de Asignación vs Etapas Matriz a priori

UN	Etapas Matriz a priori	Etapas Escenario Base	Escenario VST 0.01714 (min/\$)	Variación Porcentual
U1	46.961	65.284	69.261	6,1%
U2	70.959	114.163	118.501	3,8%
U3	74.587	90.595	97.438	7,6%
U4	66.520	100.197	101.206	1,0%
U5	71.411	93.333	99.329	6,4%
U6	40.190	45.262	49.591	9,6%
U7	27.820	34.621	36.496	5,4%
Metro	275.993	279.124	320.457	14,8%
Metrotren	4.898	6.536	6.914	5,8%
Total Etapas	679.339	829.116	899.193	8,5%
Viajes Asignados	460.150	410.326	451.832	10,1%
Etapas Viaje	1,48	2,03	2,00	-1,5%
Viajes Caminata	0	49.824	8.318	-83,3%
R² Afluencia Metro		0,827	0,857	3,5%
R² Aforos Buses		0,815	0,847	3,9%

Fuente: Proyecto EMME © DTPM

Del set de escenarios modelados, el valor del tiempo seleccionado fue aquel que minimizando los viajes en modo caminata no aumenta significativamente las etapas en Metro.

Los resultados obtenidos responden a lo esperado frente al aumento del valor del tiempo realizado, minimizando los viajes que se resuelven en modo caminata en el modelo. Respecto al nuevo valor utilizado como valor del tiempo, para fines de esta modelación no es necesario calibrarlo, ya que los únicos 2 modos que están compitiendo en el modelo de asignación son caminata y transporte público, y por la naturaleza de la matriz de demanda sabemos que todos los viajes debieran resolverse utilizando el transporte público, por lo que con un valor del tiempo más alto, se logra el objetivo.

Dado que el valor del tiempo solo es utilizado para evaluar la tarifa pagada dentro de la estrategia de viaje, la cantidad de iteraciones necesarias para obtener un resultado de equilibrio es baja, pues la primera elección es subirse al sistema de transporte o caminar.

Ciertamente una mejora significativa del modelo, pensando en futuros estudios, es la segmentación de los usuarios. Puesto que el modelo tiene solo un tipo de usuario, lo que

contrasta, por ejemplo; con el nivel de detalle de la red, la desagregación zonal y el detalle con el que se modelan las tarifas en él.

Información para considerar distintos usuarios en el STPS existe y bastante detallada si se usa directa o indirectamente aquella que se desprende de los registros de las tarjetas bip!. Además, se puede estimar y/o calibrar valores del tiempo en distintos tipos de usuarios, que permitan modelar de mejor forma comportamientos locales o de usuarios específicos, como lo son: evasores, estudiantes o usuarios de diferentes niveles socioeconómicos.

7.2 AJUSTE POR PENALIDADES DE TRANSBORDO Y PESO TIEMPO DE ESPERA

El ajuste de penalidades de transbordo y peso del tiempo de espera busca replicar las etapas por modo y unidad de negocio.

Se observa que el modelo sobreestima el número de etapas en todos los modos y unidades de negocio. Dado lo anterior, como primera medida se aumentó la penalidad del tiempo de transbordo, de tal manera de reducir las etapas de transbordo en el modelo de asignación.

Tabla 7-4: Parámetros de asignación escenarios de modelación

Definición de Parámetros	Escenario Base	Escenario 2	Escenario 3
Valor del Tiempo (min/\$)	0,08*	0,01714	0,01714
Peso del Tiempo de Espera	2	2	2
Peso del Tiempo de Caminata	2	2	2
Peso del Tiempo de Abordaje	1	1	1
α (BPR función de hacinamiento)	2	2	2
β (BPR función de hacinamiento)	4	4	4
α (Intervalo de Espera – Modo Bus)	5	5	5
β (Intervalo de Espera – Modo Bus)	1,5	1,5	1,5
α (Intervalo de Espera – Modo Metro)	1,5	1,5	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metro)	2	2	2
α (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	1,5	1,5	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	2	2	2
Penalidad por Transbordo Metro	2	2	8
Penalidad por Transbordo Metrotren	2	2	8
Penalidad por Transbordo Bus	5	5	15

Fuente: Modelo EMME © DTPM 2011. *Actualizado a pesos 2016

A modo de comparación se revisó literatura que ha estudiado valores para la penalización de transbordos, tal es el caso de Currie, G. (2005) The demand performance of Bus Rapid Transit. Journal of Public Transportation, 8, 41-55, donde se presenta un comparativo de penalidades por transbordo en minutos equivalentes del tiempo de viaje en vehículo.

Se observa que los rangos de las penalidades son amplios, así el aumento observado en este proceso de calibración queda en un rango más bien inferior dentro de lo utilizado para buses y metro en modelos de otras ciudades del mundo. Otra consideración y a modo de reflexión, es que dado que este tiempo fijo es sumado al tiempo total de viaje, a medida

que las otras componentes aumentan (Por ejemplo, la tarifa) este tiempo se hace menos relevante, por lo que fue necesario ajustarlo.

Los resultados obtenidos a partir de esta modificación son los siguientes:

Tabla 7-5: Resultados de Asignación vs Etapas Matriz a priori

UN	Etapas Matriz a priori	Esc. Base	Esc. 2	Esc. 3	Var. % Esc.3 vs Esc.2
U1	46.961	65.284	69.261	54.792	-20,9%
U2	70.959	114.163	118.501	90.109	-24,0%
U3	74.587	90.595	97.438	73.834	-24,2%
U4	66.520	100.197	101.206	77.537	-23,4%
U5	71.411	93.333	99.329	77.541	-21,9%
U6	40.190	45.262	49.591	37.845	-23,7%
U7	27.820	34.621	36.496	29.083	-20,3%
Metro	275.993	279.124	320.457	285.463	-10,9%
Metrotren	4.898	6.536	6.914	6.344	-8,2%
Total Etapas	679.339	829.116	899.193	732.548	-18,5%
Viajes Asignados TP	460.150	410.326	451.832	451.627	0,0%
Etapas Viaje	1,48	2,03	2,00	1,63	-18,5%
Viajes Caminata	0	49.824	8.318	8.523	2,5%
R² Afluencia Metro		0,827	0,857	0,876	2,3%
R² Aforos Buses		0,815	0,847	0,846	-0,2%

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

Nuevamente, los resultados obtenidos son los esperados: decrecen significativamente las etapas en los distintos modos y unidades de negocio, disminuyendo entonces las etapas por viaje de la asignación de demanda del modelo. Cabe destacar, que en los escenarios modificados el nivel de ajuste de los aforos de buses observados, como la afluencia registrada en las estaciones de metro se ha mantenido en niveles altos, más aún han aumentado su nivel de ajuste. Esto permite concluir que la diferencia en las etapas obtenidas en la asignación respecto a las registradas no se corresponden a la estructura de viajes que posee la matriz estimada, sino más bien a cómo definen las estrategias a utilizar los usuarios del modelo según los parámetros de asignación definidos.

Aun cuando el último escenario asignado presenta una disminución importante en el número de etapas, las diferencias de estas con respecto a las observadas siguen siendo significativas. Es por esto, que se analiza el impacto que tiene sobre la asignación con restricción de capacidad un aumento en el parámetro de percepción del tiempo de espera. Dicha modificación tiene por objetivo disminuir las etapas de transbordos. Con este cambio los parámetros de asignación quedan:

Tabla 7-6: Parámetros de asignación escenarios de modelación

Definición de Parámetros	Escenario Base	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Valor del Tiempo (min/\$)	0,08*	0,01714	0,01714	0,01714
Peso del Tiempo de Espera	2	2	2	3
Peso del Tiempo de Caminata	2	2	2	2
Peso del Tiempo de Abordaje	1	1	1	1
α (BPR función de hacinamiento)	2	2	2	2
β (BPR función de hacinamiento)	4	4	4	4
α (Intervalo de Espera – Modo Bus)	5	5	5	5
β (Intervalo de Espera – Modo Bus)	1,5	1,5	1,5	1,5
α (Intervalo de Espera – Modo Metro)	1,5	1,5	1,5	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metro)	2	2	2	2
α (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	1,5	1,5	1,5	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	2	2	2	2
Penalidad por Transbordo Metro	2	2	8	8
Penalidad por Transbordo Metrotren	2	2	8	8
Penalidad por Transbordo Bus	5	5	15	15

Fuente: Modelo EMME @ DTPM 2011. *Actualizado a pesos 2016

Los resultados obtenidos a partir de esta modificación son los siguientes:

Tabla 7-7: Resultados de Asignación vs Etapas Matriz a priori

UN	Etapas Matriz a priori	Esc. Base	Esc. 2	Esc. 4	Var. % Esc.4 vs Esc.2
U1	46.961	69.875	69.261	53.441	-22,8%
U2	70.959	116.715	118.501	90.539	-23,6%
U3	74.587	98.189	97.438	69.983	-28,2%
U4	66.520	103.821	101.206	75.626	-25,3%
U5	71.411	99.627	99.329	75.725	-23,8%
U6	40.190	49.815	49.591	34.962	-29,5%
U7	27.820	35.663	36.496	28.034	-23,2%
Metro	275.993	283.173	320.457	278.046	-13,2%
Metrotren	4.898	6.722	6.914	6.135	-11,3%
Total Etapas	679.339	863.600	899.193	712.492	-20,8%
Viajes Asignados TP	460.150	412.595	451.832	450.025	-0,4%
Etapas Viaje	1,48	2,03	2,00	1,59	-20,4%
Viajes Caminata	0	47.555	8.318	10.125	21,7%
R² Afluencia Metro		0,827	0,857	0,877	2,4%
R² Aforos Buses		0,815	0,847	0,844	-0,4%

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

7.3 FUNCIONES BPR PARA TIEMPOS DE VIAJE Y DE ESPERA

En este acápite se analiza la sensibilidad de los parámetros utilizados en las BPR's de la asignación con restricción de capacidad. Como se ha descrito anteriormente, la asignación con restricción de capacidad considera 2 tipos de BPR's:

- Función de congestión del segmento: representa el *discomfort* del usuario respecto del hacinamiento en el segmento modelado mediante una función BPR que adiciona tiempo al segmento a medida que este va llegando a su capacidad
- Función de congestión intervalo: representa el tiempo de espera adicional que los usuarios perciben producto de los servicios que llegan a la parada sin capacidad disponible.

A continuación se muestran los principales resultados obtenidos al variar dichos parámetros:

Tabla 7-8: Parámetros Función de Congestión en Segmentos

	Esc4 Asignación $\alpha=2$ y $\beta=4$	$\alpha=1$ y $\beta=4$	$\alpha=3$ y $\beta=4$
Total Etapas	712.492	713.759	711.922
Viajes	460.150	460.150	460.150
Viajes SITP	450.025	450.196	449.869
Viajes Caminata	10.125	9.954	10.281
etapas*viaje	1,59	1,59	1,59
UN1	53.441	53.150	53.532
UN2	90.539	89.270	91.313
UN3	69.983	70.263	69.965
UN4	75.626	74.376	76.605
UN5	75.725	75.579	75.820
UN6	34.962	34.898	35.022
UN7	28.034	28.327	27.748
Etapas Bus	428.310	425.863	430.005
Metro	321.605	324.731	319.516
Metro Sin Transbordo	278.046	281.467	275.957
Metrotren	6.135	6.429	5.960
R2 afluencia metro	0,877	0,862	0,887
R2 aforos buses	0,844	0,852	0,836

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

Tabla 7-9: Parámetros Función de Congestión en Intervalo

	Esc4 Bus $\alpha=5$ y $\beta=1.5$ Metro $\alpha=1.5$ y $\beta=2$	$\alpha=1$ y $\beta=0.2$	Bus $\alpha=1.5$ y $\beta=2$ Metro $\alpha=1.5$ y $\beta=2$
Total Etapas	712.492	688.920	724.885
Viajes	460.150	460.150	460.150
Viajes SITP	450.025	446.668	451.023
Viajes Caminata	10.125	13.482	9.127
etapas*viaje	1,59	1,55	1,61
UN1	53.441	55.110	55.260
UN2	90.539	99.680	92.729
UN3	69.983	69.962	73.540
UN4	75.626	81.574	78.271
UN5	75.725	79.871	78.707
UN6	34.962	32.221	37.390
UN7	28.034	27.639	29.151
Etapas Bus	428.310	446.058	445.048
Metro	321.605	266.680	313.020
Metro Sin Transbordo	278.046	237.756	273.787
Metrotren	6.135	5.106	6.049
R2 afluencia metro	0,877	0,811	0,871
R2 aforos buses	0,844	0,775	0,841

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

Los resultados muestran que ante variaciones significativas de los parámetros, la distribución de etapas entre modos y unidades de negocio no presenta cambios importantes en la asignación. Solo en el caso que se modifica de manera extrema el parámetro β de la función de congestión del intervalo ($\alpha=1$ y $\beta=0.2$), en donde el *discomfort* del usuario es muy sensible al tiempo de espera adicional en buses.

Dado lo expuesto, se mantuvieron los parámetros iniciales del modelo de asignación de demanda.

7.4 AJUSTE DE MATRIZ POR CONTEO

Como último paso, sobre este nuevo escenario de red se ejecutó el proceso de ajuste de la matriz a los conteos medidos dispuestos por el Mandante. Dicha información fue recolectada en Agosto de 2017 en diferentes puntos y paradas de la ciudad en el periodo Punta Mañana. Estas mediciones son parte del estudio "Elaboración de Indicadores de Desempeño del Sistema de Transporte Público de Santiago, III Etapa" correspondiente a la Orden de Trabajo N°1 "Medición Tasa de Ocupación de Buses". Las mediciones de TOC (Tasa de Ocupación) se realizaron en 144 puntos distribuidos en toda la red, para los periodos Punta Mañana, Fuera de Punta Mañana y Punta Tarde. Los puntos medidos, se

dividieron en mediciones de arcos y paraderos, en este último caso se registró la TOC antes y después de la parada. En cada punto se registró la TOC de todos los buses observados, de acuerdo a los niveles de ocupación (10 niveles) definidos para el estudio.

Un reporte detallado de cómo se construyó cada conteo y su intervalo de confianza se presenta en el Anexo del capítulo.

La información de conteo fue incorporada en el modelo a nivel de arco, de acuerdo a los siguientes criterios:

- Verificación que el nodo posee asignación de parada en la secuencia de itinerarios
- Si la medición es de tipo arco, se asigna el aforo al arco anterior y más cercano a este.
- Si la medición es de tipo parada, se asigna el conteo al arco anterior y posterior del nodo asignado a dicha parada.

De este proceso resultaron 196 arcos con conteo asignado para el proceso de ajuste de matriz.

Figura 7-2: Gráfico Asignación de conteos a la red



Fuente: Elaboración Propia

En el Anexo del capítulo, se encuentra el detalle de la localización de los conteos utilizados en el ajuste de la matriz.

En el modelo de asignación el valor del conteo quedó registrado en un atributo extra de arco.

El objetivo del ajuste fue encontrar una matriz que manteniendo su estructura se ajuste a los conteos lo mejor posible. El Alpha que reunía esos criterios fue 0.001.

El proceso de ajuste de la matriz en primera instancia, consideró 30 iteraciones y posterior a este proceso se realiza la asignación con restricción de capacidad de la matriz resultante. La parametrización del modelo de asignación con que se realizó el ajuste y la del modelo con restricción de capacidad aplicado, tuvo la siguiente especificación:

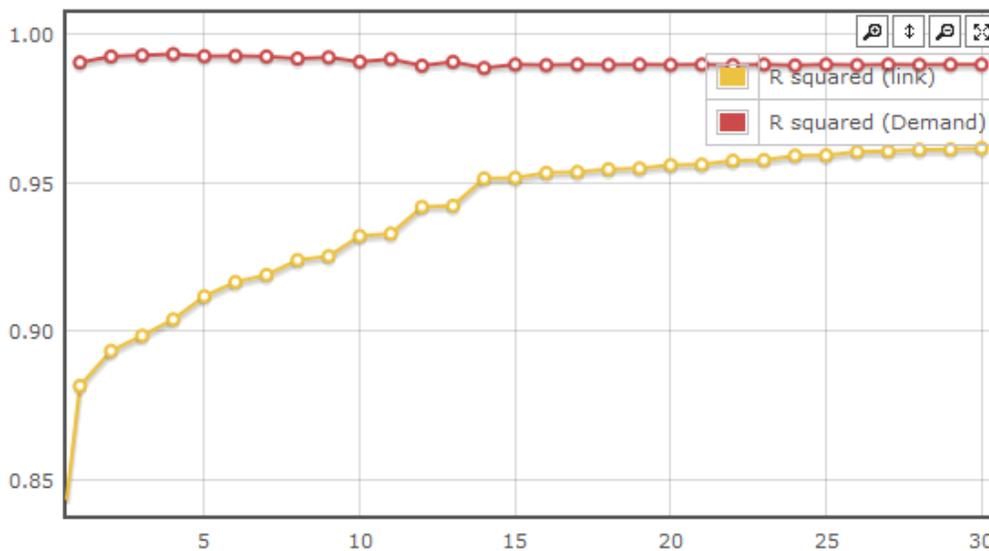
Tabla 7-10: Parámetros de asignación escenarios de modelación

Definición de Parámetros	Escenario 5	
	Ajuste Matriz a priori – mf3	Asignación con Restricción de Capacidad Matriz Ajustada – mf4
Valor del Tiempo (\$/min)	0,01714	0,01714
Peso del Tiempo de Espera	3	3
Peso del Tiempo de Caminata	2	2
Peso del Tiempo de Abordaje	1	1
α (BPR función de hacinamiento)		2
β (BPR función de hacinamiento)		4
α (Intervalo de Espera – Modo Bus)		5
β (Intervalo de Espera – Modo Bus)		1,5
α (Intervalo de Espera – Modo Metro)		1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metro)		2
α (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)		1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)		2
Penalidad por Transbordo Metro	8	8
Penalidad por Transbordo Metrotren	8	8
Penalidad por Transbordo Bus	15	15

Fuente: Modelo EMME © DTPM 2011. *Actualizado a pesos 2017

A continuación, se presenta el gráfico de convergencia del proceso.

Figura 7-3: Gráfico de ajuste de flujos y demanda por iteración.



Fuente: Elaboración Propia

El r^2 de ajuste de los flujos fue de 0,901 y de la demanda 0,990 (eje y) en la iteración 30 del proceso de calibración (ejes x).

Tabla 7-11: Resultados de Asignación vs Etapas Matriz a priori

UN	Etapas Matriz a priori	Escenario Base	Escenario 4	Escenario 5 Ajuste Matriz	Variación Esc 4 y Esc5
U1	46.961	65.284	53.441	60.967	14,1%
U2	70.959	114.163	90.539	103.692	14,5%
U3	74.587	90.595	69.983	79.577	13,7%
U4	66.520	100.197	75.626	89.311	18,1%
U5	71.411	93.333	75.725	86.702	14,5%
U6	40.190	45.262	34.962	40.356	15,4%
U7	27.820	34.621	28.034	32.526	16,0%
Metro	275.993	279.124	278.046	303.593	9,2%
Metrotren	4.898	6.536	6.135	6.634	8,1%
Total Etapas	679.339	829.116	712.492	803.358	12,8%
Demanda Asignada TP	460.150	410.326	450.025	495.052	10,0%
Etapas Viaje	1,48	2,03	1,59	1,63	2,5%
Viajes Caminata	0	49.824	10.125	10.672	5,4%
R² Afluencia Metro		0,827	0,877	0,902	2,9%
R² Aforos Buses		0,815	0,844	0,901	6,8%
R² Matriz				0,9864	
Viajes Matriz	460.150	460.150	460.150	505.724	9,9%

Fuente: Proyecto EMME® DTPM

Se observa un leve aumento en las etapas totales y en cada Unidad de Negocio, además de un aumento en el indicador de etapas por viaje. Tanto el ajuste de afluencia de Metro como el de Bus mejoran. Por su parte, la estructura de la matriz no se ve comprometida, obteniendo un R^2 superior a 0.98 respecto a la matriz a priori. La matriz ajustada tiene un **total de 505.724 viajes**, registrando un aumento de casi el 10% respecto a la matriz original.

Se presenta el nivel de ajuste por conteo general y el rango asociado a su intervalo de confianza para la modelación de asignación y para la de ajuste de matriz. El R^2 Min representa el mínimo ajuste posible considerando el intervalo de variación de los conteos, por su parte y en contraposición, el R^2 Max corresponde al mejor ajuste posible, de acuerdo a la variación de las medidas de tasas de ocupación a nivel de medición individual.

Tabla 7-12: Ajuste general conteos

	Asignación	Ajuste Matriz
R²	0,84	0,90
R²max	0,86	0,92
R²min	0,83	0,89

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

Se observa que la banda de variación es pequeña, lo que denota que la forma de medición tiene un bajo error asociado. Por lo tanto, el nivel de ajuste general en ambos escenarios se puede considerar alto.

7.5 AJUSTE DE MATRIZ A PRIORI MODIFICADA POR CONTEO

A partir de los distintos análisis realizados sobre los resultados de la asignación de demanda de la matriz ajustada obtenida en el proceso previamente descrito, se consideraron una serie de cambios y/o mejoras relativas a la representación adecuada del periodo Punta Mañana del sistema. Estos cambios consistieron en:

- ✓ Modificación de las **distancias de los conectores metro-metro** de 0.1 Km a **0.01 Km**.
- ✓ Cambio de **velocidades** de la red vial de buses a las correspondientes al periodo **7:30 – 8:30**.
- ✓ Cambio de **oferta** de los servicios de buses correspondientes a la oferta ejecutada, considerando el **ICF** de cada servicio de bus representativo del mes de Mayo del 2017.
- ✓ Mejora en la representación de las paradas del sistema en el modelo, afinando la asignación de **paradas a nodos** de la red de modelación.
- ✓ **Modificación de la matriz a priori**, eliminando los viajes que se asignan en la red sin utilizar transporte público, es decir, se resuelven en modo caminata. Siendo reasignados posteriormente por origen, de acuerdo a la cantidad de viajes de cada destino.
- ✓ Reajuste de la matriz a priori modificada considerando las nuevas condiciones operacionales incorporadas. Además, se utiliza la herramienta *Capacitated Transit Adjustment*, que permite **ajustar la matriz** de viajes utilizando la asignación de demanda **con restricción de capacidad**.

Las distancias fueron modificadas debido a que en muchos casos el modelo cuenta con arcos de la red vial con menor distancia que los conectores, incentivando así el uso de estos arcos para realizar los transbordos metro-metro, lo anterior no permite contabilizar adecuadamente dichos transbordos afectando el cálculo de las etapas de metro sin transbordo. Por lo anterior se modificaron las distancias de todos los conectores metro-metro a 0.01 Km, asegurando así que los usuarios realicen el transbordo por estos conectores.

Respecto de las velocidades, en el modelo se incorporaron la velocidad mínima registrada en el periodo Punta Mañana, considerando que la matriz a priori pretende representar los viajes de la hora más cargada del sistema. A petición del mandante, estas velocidades fueron modificadas a las registradas entre las horas 7:30 a 8:30.

Los resultados de ambas modificaciones en la asignación son los siguientes:

Tabla 7-13: Resultados modificación conectores y velocidades

UN	Etapas Matriz a priori	Esc. 4	Esc. 4 Conectores Metro-Metro	Esc. 6 Vel. 7:30-8:30	Var. %
					Esc.6 vs Esc.4 Corr.
U1	46.961	53.441	53.153	53.667	1,0%
U2	70.959	90.539	89.156	91.459	2,6%
U3	74.587	69.983	69.612	71.213	2,3%
U4	66.520	75.626	74.477	76.734	3,0%
U5	71.411	75.725	74.868	75.702	1,1%
U6	40.190	34.962	35.038	35.032	0,0%
U7	27.820	28.034	27.931	28.152	0,8%
Metro	275.993	278.046	238.177	229.455	-3,7%
Metrotren	4.898	6.135	6.115	5.843	-4,5%
Total Etapas Bips	679.339	712.492	668.535	667.260	-0,2%
Viajes Asignados TP	460.15	450.025	448.575	448.856	0,1%
Etapas Viaje	1,48	1,59	1,49	1,49	-0,3%
Viajes Caminata	0	10.125	10.032	9.751	-2,8%
R² Afluencia Metro		0,877	0,844	0,870	3,2%
R² Aforos Buses		0,844	0,877	0,826	-5,8%

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

En la tabla se registra un aumento de las etapas asignadas a bus y una disminución en las etapas asignadas a metro, lo que es consistente con las modificaciones realizadas en la red respecto a las velocidades.

Posteriormente, fue modificada la oferta de los servicios de bus considerando el cumplimiento de estos servicios representativo del mes mayo del 2017, utilizando el indicador ICF no truncado. Esta modificación se sustenta en que el ajuste se realiza considerando flujos de pasajeros observados en los principales ejes de la ciudad en los que se registran altos niveles de ocupación, influenciados por la estructura de viajes de la ciudad, pero sin duda también por el nivel de cumplimiento de los servicios de buses.

De esta manera, se pretende evitar deformar la matriz en el proceso de ajuste debido al incumplimiento de los servicios de buses, ya que no es una variable fija del sistema, una vez ajustada la matriz a priori considerando el nivel de cumplimiento, se asignó la matriz ajustada utilizando la oferta del Plan de Operaciones de mayo del 2017, escenario considerado como base para el resto de los escenarios de modelación.

Tabla 7-14: Resultados modificación oferta buses por ICF no truncado

UN	Etapas Matriz a priori	Esc. 4 Conectores Metro-Metro	Esc. 6 Velocidades 7:30-8:30	Esc. 7 Oferta ICF Buses	Var. % Esc.7 vs Esc.6
U1	46.961	53.153	53.667	46.728	-12,9%
U2	70.959	89.156	91.459	84.997	-7,1%
U3	74.587	69.612	71.213	68.364	-4,0%
U4	66.520	74.477	76.734	69.893	-8,9%
U5	71.411	74.868	75.702	73.881	-2,4%
U6	40.190	35.038	35.032	32.472	-7,3%
U7	27.820	27.931	28.152	27.395	-2,7%
Metro	275.993	238.177	229.455	246.284	7,3%
Metroren	4.898	6.115	5.843	6.489	11,1%
Total Etapas Bips	679.339	668.535	667.260	656.509	-1,6%
Viajes Asignados TP	460.15	448.575	448.856	446.660	-0,5%
Etapas Viaje	1,48	1,49	1,49	1,47	-1,1%
Viajes Caminata	0	10.032	9.751	11.948	22,5%
R² Afluencia Metro		0,844	0,870	0,886	1,8%
R² Aforos Buses		0,877	0,826	0,861	4,3%

Fuente: Proyecto EMME © DTPM

Los resultados muestran un aumento significativo en el nivel de ajuste de Bus y Metro. Como es de esperar, disminuyen las etapas asignadas a bus y aumentan las asignadas a Metro, cuyos servicios no tienen mermada su oferta respecto a la programación. Se registra también un aumento en los viajes que se resuelven en modo caminata.

Posteriormente, se incorporó en los itinerarios de buses la definición mejorada de las paradas-nodos del sistema. De esta manera, la accesibilidad de los usuarios a los servicios de buses queda mejor representada. La asignación de este nuevo escenario reporta los siguientes resultados:

Tabla 7-15: Resultados modificación asociación nodo-parada

UN	Etapas Matriz a priori	Esc. 6 Velocidades 7:30-8:30	Esc. 7 Oferta ICF Buses	Esc. 8 Modificación nodo-parada	Var. % Esc.8 vs Esc.7
U1	46.961	53.667	46.728	49.260	5,4%
U2	70.959	91.459	84.997	84.886	-0,1%
U3	74.587	71.213	68.364	67.311	-1,5%
U4	66.520	76.734	69.893	72.665	4,0%
U5	71.411	75.702	73.881	73.803	-0,1%
U6	40.190	35.032	32.472	33.201	2,2%
U7	27.820	28.152	27.395	27.740	1,3%
Metro	275.993	229.455	246.284	243.010	-1,3%
Metrotren	4.898	5.843	6.489	6.330	-2,5%
Total Etapas Bips	679.339	667.260	656.509	658.212	0,3%
Viajes Asignados TP	460.15	448.856	446.660	447.017	0,1%
Etapas Viaje	1,48	1,49	1,47	1,47	0,2%
Viajes Caminata	0	9.751	11.948	11.590	-3,0%
R² Afluencia Metro		0,870	0,886	0,875	-1,2%
R² Aforos Buses		0,826	0,861	0,851	-1,2%

Fuente: Proyecto EMMÉ @ DTPM

Al mejorar la representación de las paradas en la red de modelación se registra un aumento en las etapas de bus, concentradas principalmente en UN1 y UN4, bajando en la misma medida las etapas asignadas a Metro.

En este nuevo escenario, también se observa una disminución de los viajes que utilizan solo el modo caminata. Estos viajes tienen una distancia promedio de 1.24 Km, por lo que corresponden a viajes cortos, los que en su mayoría son generados en el proceso de zonificación de los viajes desde las paradas a zonas, de acuerdo a la metodología de este procedimiento. Por lo tanto, los viajes que en la asignación se resuelven en modo caminata, fueron reasignados en sus destinos a aquellos destinos en los que si se utiliza transporte público, manteniendo sus orígenes.

$$MM_{ij} = MT_{ij} + MC_i * MT_{ij}/MT_i$$

$$MT_{ij} = MP_{ij} - MC_{ij}$$

MM_{ij} : viajes matriz a priori modificada del origen i al destino j

MP_{ij} : viajes matriz a priori del origen i al destino j

MC_{ij} : viajes caminata del origen i al destino j

MT_{ij} : viajes transporte público del origen i al destino j

MC_i : viajes caminata del origen i

MT_i : viajes transporte público del origen i

Los resultados de la asignación de esta nueva matriz de viajes se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 7-16: Resultados modificación matriz a priori

UN	Etapas Matriz a priori	Esc. 7 Vel. 7:30:8:30 + Oferta ICF Buses	Esc. 8 Modificación nodo-parada	Esc. 9 Modificación Matriz a priori	Var. % Esc.9 vs Esc.8
U1	46.961	46.728	49.260	50.371	2,3%
U2	70.959	84.997	84.886	87.005	2,5%
U3	74.587	68.364	67.311	68.654	2,0%
U4	66.520	69.893	72.665	74.464	2,5%
U5	71.411	73.881	73.803	75.438	2,2%
U6	40.190	32.472	33.201	34.033	2,5%
U7	27.820	27.395	27.740	28.089	1,3%
Metro	275.993	246.284	243.010	249.186	2,5%
Metroren	4.898	6.489	6.330	6.420	1,4%
Total Etapas Bips	679.339	656.509	658.212	673.668	2,3%
Viajes Asignados TP	460.15	446.660	447.017	458.196	2,5%
Etapas Viaje	1,48	1,47	1,47	1,47	-0,1%
Viajes Caminata	0	11.948	11.590	362	-96,9%
R² Afluencia Metro		0,886	0,875	0,872	-0,4%
R² Aforos Buses		0,861	0,851	0,848	-0,4%

Fuente: Proyecto EMME © DTPM

Tal como se espera, los viajes que se resuelven en modo caminata disminuyen casi en su totalidad y se observa que estos se distribuyen de manera homogénea en las distintas unidades de negocio y Metro, siendo inferior el aumento registrado en Metroren.

Finalmente, se ajusta la matriz a priori modificada utilizando la herramienta Capacitated Transit Adjustment, dispuesta por INRO al consultor en su versión preliminar. Esta nueva herramienta utiliza la misma metodología de ajuste que la aplicada en el ajuste documentado en el Informe de Avance previo. Sin embargo, los flujos asignados que utiliza para ajustar a los conteos son obtenidos a partir de una asignación con restricción de capacidad, mientras que el ajuste anterior utilizaba los flujos resultantes de una asignación Extended, que no considera la capacidad disponible.

Los resultados obtenidos son:

Tabla 7-17: Resultados ajuste matriz a priori modificada

UN	Etapas Matriz a priori	Esc. 7 Vel. 7:30:8:30 + Oferta ICF + Nodo-parada	Esc. 9 Modificación Matriz a priori	Esc. 10 Ajuste Matriz a priori modificada	Var. % Esc.10 vs Esc.9
U1	46.961	49.260	50.371	55.895	11,0%
U2	70.959	84.886	87.005	98.396	13,1%
U3	74.587	67.311	68.654	76.400	11,3%
U4	66.520	72.665	74.464	84.226	13,1%
U5	71.411	73.803	75.438	82.386	9,2%
U6	40.190	33.201	34.033	38.243	12,4%
U7	27.820	27.740	28.089	33.297	18,5%
Etapas Bus	398.448	408.866	418.054	468.843	12,1%
Metro	275.993	243.010	249.186	266.291	6,9%
Metrotren	4.898	6.330	6.420	7.121	10,9%
Total Etapas Bips	679.339	658.212	673.668	742.281	10,2%
Viajes Matriz	460.149	460.149	460.149	494.730	7,5%
Viajes Asignados TP	460.150	447.017	458.196	492.090	7,4%
Etapas Viaje	1,48	1,47	1,47	1,51	2,6%
Viajes Caminata	0	11.590	362	1.049	189,5%
R² Afluencia Metro		0,875	0,872	0,895	2,7%
R² Aforos Buses		0,851	0,848	0,933	10,1%

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

Los resultados muestran un incremento de un 7.5% de la matriz de viajes, mientras las etapas aumentan un 10%, lo que genera un alza de las etapas por viaje. Mientras que los viajes en modo caminata se triplican.

Por otro lado, el nivel de ajuste obtenido para los conteos aumenta significativamente, mientras que el ajuste de la afluencia de Metro por estación aumenta levemente.

Tabla 7-18: Ajuste general conteos

	Asignación	Ajuste Matriz
R²	0,85	0,93
R²max	0,86	0,95
R²min	0,83	0,92

Fuente: Proyecto EMME @ DTPM

Considerando que el ajuste de la matriz a priori, se realizó utilizando la oferta ejecutada del sistema representativa del periodo de análisis, es que posteriormente la matriz obtenida fue asignada en el escenario en que la oferta corresponde al plan operacional de mayo 2017,

quedando este como la base para los escenarios que se presentarán en los próximos acápite. Sin embargo, en la presentación de resultados de la asignación de la matriz calibrada, la asignación es comparada con datos observados, por lo que la asignación considera la oferta ejecutada del sistema, es decir, utilizando ICF.

Tabla 7-19: Parámetros de asignación escenarios de modelación

Definición de Parámetros	Escenario 5
Matriz	Matriz ajustada mf4
Valor del Tiempo (\$/min)	0,01714
Peso del Tiempo de Espera	3
Peso del Tiempo de Caminata	2
Peso del Tiempo de Abordaje	1
α (BPR función de hacinamiento)	2
β (BPR función de hacinamiento)	4
α (Intervalo de Espera – Modo Bus)	5
β (Intervalo de Espera – Modo Bus)	1,5
α (Intervalo de Espera – Modo Metro)	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metro)	2
α (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	2
Penalidad por Transbordo Metro	8
Penalidad por Transbordo Metrotren	8
Penalidad por Transbordo Bus	15

Fuente: Modelo EMME @ DTPM 2011. *Actualizado a pesos 2017

A continuación se presentan los resultados globales del escenario de modelación.

Tabla 7-20: Resultados Globales

Ítem	Etapas Matriz a priori	Escenario 4	Esc5 – matriz ajustada	Variación % Esc 10/Datos Obs
Etapas Buses	398.448	418.054	468.843	18%
Etapas Metro	275.993	249.186	266.291	-4%
Etapas Metro (con transbordo metro metro)	S/I	380.295	100.379	-
Total Etapas (sin transbordo metro metro)	679.339	673.668	742.281	9%
Matriz de viajes	460.150	460.149	494.730	8%
Etapas de viaje por Bip	1,48	1,47	1,51	2%
Etapas caminando	0	362	1.049	-

Fuente: Proyecto DTPM EMME @

A continuación se presentan las etapas por Unidad de Negocio y los transbordos entre modos y entre Unidades de Negocio. La información de etapas es comparada con los datos observados, provenientes de la matriz construida.

Tabla 7-21: Resultados Etapas por Unidad de Negocio

Etapas por UN	Etapas Matriz a priori	Esc 9– Matriz asignada	Esc10 – Matriz Ajustada	Variación % Esc 10/Datos Obs
U1	46.961	50.371	55.895	19,0%
U2	70.959	87.005	98.396	38,7%
U3	74.587	68.654	76.400	2,4%
U4	66.520	74.464	84.226	26,6%
U5	71.411	75.438	82.386	15,4%
U6	40.190	34.033	38.243	-4,8%
U7	27.820	28.089	33.297	19,7%

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

Se observa una sobreestimación de las etapas de viaje en la mayoría de las Unidades de negocio.

Tabla 7-22: Transbordos entre Modos

Etapas Transbordo	Etapas Matriz a priori	Esc 9 – Matriz asignada	Esc10 – Matriz Ajustada	Variación % Esc 10/Datos Obs
Bus-Bus	59.327	49.951	62.993	6%
Bus-Metro	117.261	122.125	136.631	17%
Metro-Metro	S/I	104.264	114.004	-
Metro-Bus	37.459	35.669	41.673	11%
Bus-Metrotren	957	2.130	2.630	175%
Metro-Metrotren	239	374	389	63%
Metrotren-Bus	539	435	583	8%
Metrotren-Metro	3.345	4.783	5.272	58%

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

8 ESCENARIOS DE MODELACIÓN PUNTA MAÑANA

A continuación se describen los escenarios modelados y que son reportados en el presente capítulo.

- **E0: Escenario BASE_JULIO 2018:** este escenario considera la actualización de la oferta de buses (trazados, frecuencia y capacidad), según lo programado para Julio 2018. Además, se procedió a actualizar los parámetros de operación de Metro a la misma fecha, incorporando a la red la operación de la Línea 6 y ajustando la oferta, capacidad y tiempos entre estaciones del resto de las líneas.
- **E1: E0 + L3 + INDEPENDENCIA:** Sobre el **E0**, se incorpora la operación de la Línea 3, se actualizan las condiciones de operación del resto de las líneas y se ajusta el eje de independencia, simulando su operación como la de un corredor, ajustando así las velocidades por arco de eje y la ubicación de los paraderos
- **E2 (E2V)*: E1 + Ajuste de Malla por L3:** Sobre el escenario **E1**, se incorporan ajustes a la malla de buses (trazados, frecuencias y capacidad) que corresponden a propuestas para mejorar la lógica de la malla de buses producto de la entrada de operación de la Línea 3 de Metro.

En ninguno de los escenarios se consideran cambios en la información de entrada de Metrotren, ni un cambio masivo de velocidades de buses de la red respecto a lo incorporado inicialmente al modelo. Tampoco existe un cambio en la matriz a asignar.

Respecto a la matriz de viajes asignada, esta corresponde a la matriz ajustada correspondiente al mes de agosto del 2017.

A continuación un resumen de los resultados de los escenarios evaluados.

Tabla 8-1: Resultados Globales

Ítem	Etapas Matriz a priori	Esc. Base Mayo 2017	E0 Base Jul. 2018	E1 L3 + Corredor	E2V Ajuste Malla L3
Etapas Buses	398.481	493.947	482.515	467.106	463.198
Etapas Metro	275.993	249.971	261.005	274.126	278.676
Etapas Metro (con transbordo Metro Metro)	-	349.786	366.147	385.482	392.833
Total Etapas (sin transbordo Metro Metro)	674.474	750.387	750.234	747.928	748.603
Matriz de viajes	460.149	494.730	494.730	494.730	494.730
Etapas de viaje por Bip	1,48	1,52	1,52	1,52	1,52
Etapas caminando	0	152	410	384	484

Fuente: Proyecto DTPM EMME ©

Se observa un aumento en las etapas de metro y una disminución de las etapas de buses en el escenario de Julio 2018 respecto de Mayo 2017, principalmente explicado por la incorporación de la Línea 6. Las etapas totales se mantienen casi invariantes, así como también las etapas de viaje por bip.

Al analizar el escenario 1, respecto a la base, se observa una disminución en las etapas totales y en las etapas de buses, en contra posición con el aumento en las etapas en Metro. Cabe destacar que esto es consistente con la incorporación de la Línea 3 al escenario de Modelación. Se mantienen las etapas por viaje y se reduce levemente los viajes que se resuelven en modo caminata.

Por su parte, al analizar el escenario E2V, respecto a la base PO Julio 2018, se observa una disminución en las etapas totales, debido a la baja en las etapas asignadas a bus. Mientras que las etapas asignadas a Metro aumentan, aunque no en el mismo nivel que la disminución en las etapas de bus. Con todo lo anterior, las etapas bip por viaje no registran una variación significativa.

A continuación se presentan las etapas por Unidad de Negocio y los transbordos entre modos. La información de etapas es comparada con los datos observados, provenientes de la matriz construida.

Tabla 8-2: Resultados Etapas por Unidad de Negocio

Etapas por UN	Etapas Matriz a priori	Esc. Base Mayo 2017	E0 Base Jul. 2018	E1 L3 + Corredor	E2V Ajuste Malla L3
U1	46.416	59.310	57.014	56.059	55.148
U2	70.136	103.836	101.084	95.405	90.774
U3	73.731	80.946	77.894	75.708	77.560
U4	65.762	88.750	88.280	85.578	84.424
U5	70.585	85.480	83.626	80.153	79.939
U6	39.729	41.472	40.572	40.161	41.206
U7	27.498	34.153	34.045	34.041	34.147
Sin Unidad	4.624	0	0	0	0

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

El escenario E0 Julio 2018, presenta una baja a nivel de etapas de bus, generalizada por Unidad de Negocio. Sin perjuicio de esto se observa que el 87% de la pérdida se concentra en las Unidades 1, 2, 3 y 5. Por su parte, en el escenario E1: L3 +Corredor se disminuyen las etapas de viaje en todas las Unidades de Negocio con excepción de la Unidad 7.

Se observa que a nivel de unidad de negocio, el mayor impacto de la implementación de la Línea 3 de metro y las modificaciones en la malla de buses asociadas (E2V Ajuste Malla L3), se registran en la UN2, que reporta una baja del 10%. Le siguen las unidades UN1, UN4 y UN 5 con bajas del orden del 3%.

Tabla 8-3: Transbordos entre Modos

Etapas Transbordo	Etapas Matriz a priori	Esc. Base Mayo 2017	E0 Base Jul. 2018	E1 L3 + Corredor	E2V Ajuste Malla L3
Bus-Bus	59.327	69.820	62.215	55.599	54.219
Bus-Metro	117.261	136.894	142.645	148.555	150.590
Metro-Metro	125.541	99.815	105.142	111.356	114.157
Metro-Bus	37.459	42.610	43.763	42.189	42.337
Bus-Metrotren	957	2.455	2.961	2.925	2.900
Metro-Metrotren	239	337	395	398	400
Metrotren-Bus	539	629	559	549	579
Metrotren-Metro	3.345	4.655	4.957	4.950	4.963

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

Los escenarios E0 Base Jul. 2018, E1 L3 + Corredor y E2V Ajuste Malla L3 presentan una baja sostenida de transbordos bus-bus y un alza sostenida de transbordos bus-metro y metro-metro. Por su parte, los transbordos Metro-Bus aumentan y luego se mantienen en los niveles de Mayo 2017.

9 ESCENARIOS DE MODELACIÓN. CAMBIOS TARIFARIOS

Se desarrollaron 4 escenarios de sensibilidad de tarifa que se describen en el siguiente cuadro.

Tabla 9-1: Escenarios Tarifarios sobre Escenario PO Julio 2018

ESCENARIO	SET DE DATOS para PMA
E1: Base PO 07 JULIO 2018	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Actualización PO Julio2018 ✓ Actualización parámetros Línea 6 Julio 2018 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$760 ▪ Transbordo Bus-Metro: \$100 ▪ Transbordo Bus-Metrotren: \$100 ▪ Otros Transbordos: \$0
E7: E1 + Modificación Tarifa Metro 1 (-\$20)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$740 ▪ Transbordo Bus-Metro: \$80 ▪ Transbordo Bus-Metrotren: \$80 ▪ Otros Transbordos: \$0
E8: E1 + Modificación Tarifa Metro 2 (+\$20)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$780 ▪ Transbordo Bus-Metro: \$120 ▪ Transbordo Bus-Metrotren: \$120 ▪ Otros Transbordos: \$0
E9: E1 + Modificación Tarifa Metro 3 (-\$130)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$630 ▪ Transbordo Metro-Bus: \$30 ▪ Transbordo Metrotren-Bus: \$30 ▪ Otros Transbordos: \$0
E10: E1 + Modificación Tarifa Metro 4 (-\$80)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$680 ▪ Transbordo Metro-Bus: \$20 ▪ Transbordo Metrotren-Bus: \$0 ▪ Otros Transbordos: \$0

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presentan los resultados de cada asignación.

Tabla 9-2: Resultados generales

Ítem	Escenario Base_Jul18	Tarifa 1 Metro -\$20	Tarifa 2 Metro +\$20	Tarifa 3 Metro -\$130	Tarifa 4 Metro -\$80
Etapas Buses	482.515	481.289	483.217	473.581	480.402
Etapas Metro	261.005	263.173	259.737	270.860	269.611
Etapas Metro (con transbordo Metro Metro)	366.147	368.486	364.916	377.375	372.744
Total Etapas (sin transbordo Metro Metro)	750.234	751.186	749.650	751.214	756.757
Matriz de viajes	494.730	494.730	494.730	494.730	494.730
Etapas Bip por Viaje	1,523	1,525	1,521	1,524	1,536
Viajes Caminata	410	402	420	341	372

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que en los Escenarios Tarifa1 y Tarifa3, la disminución de la tarifa en metro produce un aumento en las etapas de viaje. Por su parte, disminuyen las etapas en bus y aumentan las etapas en Metro. Además, disminuyen los viajes solo caminata, respecto a la situación base.

En el Escenario Tarifa2, el aumento de la tarifa en metro, produce una disminución de las etapas por viaje. Además, aumenta las etapas en bus y disminuyen las etapas en Metro.

En el escenario tarifa4, se produce un efecto contrario a la intuición toda vez que a pesar de disminuir la tarifa aumentan las etapas de viaje, esto se explica porque el precio relativo del transbordo de metro a bus es menor respecto a los escenarios Tarifa1, Tarifa2 y Base, donde el transbordo es \$80, \$120 y \$100, mientras que en el escenario en comento es \$20, por lo que comparativamente con dichos escenarios los viajes de dos etapas para resolver un viaje son más atractivos.

Tabla 9-3: Viajes

Viajes	Escenario Base_Jul18	Tarifa 1 Metro -\$20	Tarifa 2 Metro +\$20	Tarifa 3 Metro -\$130	Tarifa 4 Metro -\$80
Viajes TP	492.728	492.736	492.718	492.797	492.766
Viajes Solo Metro	95.614	96.227	95.037	101.657	96.143
Viajes Solo Bus	231.309	229.547	232.965	221.918	223.136
Viajes Metro+Bus	165.788	166.945	164.699	169.203	173.470
		0,6%	-0,6%	6,3%	0,6%
		-0,8%	0,7%	-4,1%	-3,5%
		0,7%	-0,7%	2,1%	4,6%

Fuente: Elaboración Propia

Al analizar la configuración de los viajes, se observa plena consistencia con la tarifa, aumentan los viajes solo metro a medida que disminuye su tarifa y aumentan los viajes combinados a medida que el precio relativo entre ambos modos disminuye.

El siguiente análisis corresponde a un análisis de elasticidad e ingreso. Cabe hacer notar que **el modelo tiene demanda fija por lo tanto las elasticidades corresponden a elasticidades a nivel de distribución de viajes y etapas en la red.**

No se calculan elasticidades por etapa-modo pues el precio ponderado del modo es un resultado de la asignación del escenario.

El siguiente cuadro presenta las elasticidades de los escenarios respecto a la tarifa base. Cabe hacer notar que en el caso de los viajes solo bus, se calcula una elasticidad cruzada al cambio del precio en metro, toda vez que en los escenarios no existe variación en el precio del viaje solo bus.

Tabla 9-4: Elasticidades

ELASTICIDADES	Tarifa 1 Metro - \$20	Tarifa 2 Metro +\$20	Tarifa 3 Metro - \$130	Tarifa 4 Metro - \$80
Viajes Solo Metro	0,2436	0,2292	0,3695	0,0525
Viajes Solo Bus *	0,2894	0,2721	0,2374	0,3357
Viajes Metro+Bus	0,2652	0,2496	0,1565	0,4401

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que en los escenarios donde el Metro tiene una tarifa mayor a la del bus, los Usuarios sólo Metro son más inelásticos que aquellos que utilizan Metro y Bus. Además, si la tarifa del metro baja, la demanda de los viajes Metro-Bus se hace más elástica, esto significa que se fugan con más facilidad. Además, se observa que mientras mayor es la tarifa de transbordo, más inelástico es el viaje combinado.

Posteriormente, se desarrollaron 4 escenarios de sensibilidad de tarifa, sobre el Escenario L3+Ajuste de Malla, que se describen en el siguiente cuadro.

Tabla 9-5: Escenarios Tarifarios sobre el Escenario L3+Ajustes de Malla

ESCENARIO	SET DE DATOS para PMA
E5: Base L3 con ajuste de Malla	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Malla PO Julio 2018 con Actualización Malla L3+Ajustes de Malla ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$760 ▪ Transbordo Bus-Metro: \$100 ▪ Transbordo Bus-Metrotren: \$100 ▪ Otros Transbordos: \$0
E11: E5 + Modificación Tarifa Metro 1 (-\$20)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$740 ▪ Transbordo Bus-Metro: \$80 ▪ Transbordo Bus-Metrotren: \$80 ▪ Otros Transbordos: \$0
E12: E5 + Modificación Tarifa Metro 2 (+\$20)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$780 ▪ Transbordo Bus-Metro: \$120 ▪ Transbordo Bus-Metrotren: \$120 ▪ Otros Transbordos: \$0
E12: E5 + Modificación Tarifa Metro 3 (-\$130)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$630 ▪ Transbordo Metro-Bus: \$30 ▪ Transbordo Metrotren-Bus: \$30 ▪ Otros Transbordos: \$0
E13: E5 + Modificación Tarifa Metro 4 (-\$80)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifa Bus: \$660 ▪ Tarifa Metro: \$680 ▪ Transbordo Metro-Bus: \$20 ▪ Transbordo Metrotren-Bus: \$0 ▪ Otros Transbordos: \$0

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presentan los resultados de cada asignación.

Tabla 9-6: Resultados generales

Ítem	Base L3- Malla	Tarifa 1 Metro -\$20	Tarifa 2 Metro +\$20	Tarifa 3 Metro -\$130	Tarifa 4 Metro -\$80
Etapas Buses	463.198	462.049	464.398	453.439	461.624
Etapas Metro	278.676	280.623	276.774	288.911	287.438
Etapas Metro (con transbordo Metro Metro)	392.833	394.896	390.811	404.652	399.476
Total Etapas (sin transbordo Metro Metro)	748.618	749.430	747.905	749.164	755.847
Matriz de viajes	494.730	494.730	494.730	494.730	494.730
Etapas Bip por Viaje	1,520	1,521	1,518	1,520	1,534
Viajes Caminata	484	459	493	422	465

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que en los Escenarios Tarifa1 y Tarifa3, la disminución de la tarifa en metro produce un aumento en las etapas de viaje. Por su parte, disminuyen las etapas en bus y aumentan las etapas en Metro. Además, disminuyen los viajes solo caminata, respecto a la situación base.

En el Escenario Tarifa2, el aumento de la tarifa en metro, produce una disminución de las etapas por viaje. Además, aumentan las etapas en bus y disminuyen las etapas en Metro.

En el escenario Tarifa4, se produce un efecto contrario a lo que la intuición podría dictar, toda vez que a pesar de disminuir la tarifa aumentan las etapas de viaje, esto se explica porque el precio relativo del transbordo de metro a bus es menor respecto a los escenarios Tarifa1 Tarifa2 y Base, donde el transbordo es \$80, \$120 y \$100, mientras que en el escenario en comento es \$20, por lo que comparativamente con dichos escenarios los viajes de dos etapas para resolver un viaje son más atractivos.

Tabla 9-7: Viajes

Viajes	Escenario Base_Jul18	Tarifa 1 Metro - \$20	Tarifa 2 Metro +\$20	Tarifa 3 Metro - \$130	Tarifa 4 Metro - \$80
Viajes TP	492.654	492.679	492.645	492.716	492.673
Viajes Solo Metro	105.560	106.325	104.820	112.531	105.944
Viajes Solo Bus	213.951	212.028	215.850	203.785	205.223
Viajes Metro+Bus	173.117	174.297	171.954	176.377	181.491
		0,7%	-0,7%	6,6%	0,4%
		-0,9%	0,9%	-4,8%	-4,1%
		0,7%	-0,7%	1,9%	4,8%

Fuente: Elaboración Propia

Al analizar la configuración de los viajes, se observa plena consistencia con la tarifa, aumentan los viajes solo metro a medida que disminuye su tarifa y aumentan los viajes combinados a medida que el precio relativo entre ambos modos disminuye.

El siguiente análisis corresponde a un análisis de elasticidad e ingreso. Cabe hacer notar que **el modelo tiene demanda fija por lo tanto las elasticidades corresponden a elasticidades a nivel de distribución de viajes y etapas en la red.**

No se calculan elasticidades por etapa-modo pues el precio ponderado del modo es un resultado de la asignación del escenario.

El siguiente cuadro presenta las elasticidades de los escenarios respecto a la tarifa base. Cabe hacer notar que en el caso de los viajes solo bus, se calcula una elasticidad cruzada al cambio del precio en metro, pues en los escenarios analizados no existe variación en el precio del viaje solo bus.

Tabla 9-8: Elasticidades

Elasticidades	Tarifa 1 Metro - \$20	Tarifa 2 Metro +\$20	Tarifa 3 Metro -\$130	Tarifa 4 Metro -\$80
Viajes Solo Metro	0,2755	0,2664	0,3861	0,0346
Viajes Solo Bus	0,3416	0,3373	0,2778	0,3875
Viajes Metro+Bus	0,2590	0,2552	0,1432	0,4595

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que en los escenarios donde el Metro tiene una tarifa mayor a la del bus, los usuarios sólo Metro son más inelásticos que aquellos que utilizan Metro y Bus. Además, si la tarifa del metro baja, la demanda de los viajes Metro-Bus se hace más elástica, esto significa que se fugan con más facilidad. Además, se observa que mientras mayor es la tarifa de transbordo, más inelástico es el viaje combinado.

10 ESTIMACIÓN MATRIZ FUERA DE PUNTA

El objetivo de esta tarea es estimar una matriz de viajes que permita representar de la mejor forma posible la demanda real y comportamiento de los usuarios del STPS en el periodo Fuera Punta en la situación de calibración.

Para este objetivo se considera necesario utilizar la Tabla de Etapas y Tabla de Viajes, disponibilizadas por DTPM para el desarrollo del presente estudio, además de la información de evasión y los boletos Edmonson de Metro, que forman parte de la demanda de transporte, demanda que no se encuentra representada en las tablas mencionadas. Dicha información permite la generación de tres matrices separadas para el periodo, que posteriormente es necesario integrar, de acuerdo a las consideraciones y metodología que se exponen en este capítulo.

El objetivo de la construcción de la matriz OD es representar la estructura de viajes del periodo Fuera Punta. Respecto de la forma de agrupar los viajes, se mantiene la definición adoptada previamente para la Punta Mañana, en orden de agrupar viajes según hora media de viaje.

Previo a la estimación de la matriz es necesario realizar dos definiciones:

- Si se utiliza el período Fuera de Punta Mañana o Fuera de Punta Tarde como referencia para la Fuera de Punta
- Si se utiliza una matriz de 1 hora que sea representativa del período o una matriz promedio

Para esto, en la siguiente tabla se muestra una comparación entre los períodos Fuera de Punta Mañana y Fuera de Punta Tarde, donde se muestra su definición y los pros y contras de utilizar cada uno de estos períodos como referencia para la Fuera de Punta.

Tabla 10-1: Comparación período Fuera de Punta Mañana versus Fuera de Punta Tarde

	Fuera Punta Mañana	Fuera Punta tarde
Definición	09:30 - 12:30	14:00 - 17:30
Pros	Modelos estratégicos/tácticos de fuera punta típicamente usan datos de punta mañana. En este sentido, representar este periodo permite comparar y analizar evolución de viajes (Ref: ESTRAUS 11:00-12:00 hrs). Dada la metodología de estimación de viajes por conjunto de etapas ordenada cronológicamente (desde inicio a fin	Estructura de viajes menos estudiada y analizada respecto de FPM, que sin embargo, involucra una parte importante de la demanda diaria.

	Fuera Punta Mañana	Fuera Punta tarde
	de día), es probable que la calidad de la estimación empeore a lo largo del día en cuanto aumenta la posibilidad de error de agrupación de etapas.	
Contras	Estructura de viajes más estudiada y conocida respecto de FPT.	No hay modelos para comparar y evaluar evolución de viajes.

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la utilización del período Fuera de Punta Mañana posee más puntos a favor, que tienen que ver con que representar este periodo permite comparar y analizar la evolución de viajes, por lo que se recomienda usar como referencia este período en lugar del Fuera de Punta Tarde.

Por otro lado, en la siguiente tabla se muestran las características de una matriz de 1 hora representativa del período versus una matriz promedio.

Tabla 10-2: Comparación de matriz de una hora representativa versus matriz promedio

	Una hora	Hora promedio
Definición	Suma de número de viajes según hora de media de viaje, en grupos de una hora, utilizar matriz que represente el comportamiento del periodo fuera de punta.	Se calcula factor de hora más cargada como la matriz de una hora con más viajes según hora media de viaje, sobre el total de viajes de hora fuera punta promedio. La matriz de modelación es una matriz promedio de fuera de punta amplificada por este factor.
Qué representa	Una hora de viajes según hora media, escogida para que represente el periodo.	Estructura de matriz es la matriz promedio de hora fuera de punta que considera todos los viajes del periodo, amplificada por el factor de hora más cargada de medio de viaje.
Pros	Si se desea calibrar, se puede medir durante la hora escogida. Si se desea comparar con modelo ESTRAUS, esta opción es más comparable.	Representa todos los viajes del periodo fuera de punta.

	Una hora	Hora promedio
Contras	Si se escoge hora colindante a periodos punta (9:30 para FPM y 16:30 para FPT) puede estar fuertemente influenciada por viajes de los periodos punta.	Si se desea calibrar se debería medir durante todo el periodo y aplicar algún tipo de corrección.

Fuente: Elaboración propia

Se observa que utilizar una matriz de 1 hora representativa del período Fuera de Punta posee más puntos a favor que la matriz promedio, los que tienen que ver en primer lugar con la posibilidad de medir durante la hora escogida si se desea calibrar, y en segundo lugar, con que si se desea comparar con modelo ESTRAUS, esta opción es más comparable, por lo que se recomienda escoger la matriz de 1 hora como representativa de Fuera de Punta en lugar de la matriz promedio, pero siempre teniendo cuidado de no escoger una hora colindante con PM o PT, de manera de no influenciar los viajes por los períodos punta.

En cuanto a la construcción de la matriz de viajes en sí misma, se debe escoger la hora más representativa del periodo fuera de punta mañana. Para este análisis se propone comparar la proporción de orígenes y destinos de viajes según el enfoque de hora media, para las matrices de viajes de una hora a partir de las 9:30, 10:30 y 11:30.

Teniendo en cuenta la similar estructura de las tres matrices de una hora analizadas, y de acuerdo al objetivo planteado en este capítulo, el criterio recomendado para la elección de la hora de modelación es **la que contiene viajes según hora media de viaje, en un día laboral normal promedio, entre 11:00 a 12:00.**

La estimación de la matriz OD se compone de 3 procesos y todos ellos se basan en la Tabla de Viajes, a la cual se le aplica transformaciones de estructura y/o factores de corrección según indique la información adicional. Los procesos aplicados son: Incorporación de evasión parcial (también denominada evasión blanda), Incorporación de evasión sistemática (o evasión dura) e Incorporación de boletos Edmonson. La metodología de cada uno de estos procesos se explica en los siguientes puntos y se aplica de manera independiente, para revisar el impacto de cada proceso sobre la matriz obtenida de la tabla de viajes TB9. La matriz OD de fuera punta se obtiene de la suma de las modificaciones o matrices generadas en cada paso.

Es preciso notar que, la zonificación utilizada corresponde a la definida en el capítulo 5 del presente estudio y corresponde a la agrupación de manzanas al interior de cada zona 777. En consecuencia, las proyecciones de demanda se realizan de la manera tradicional ya que la propia zonificación 777 respeta los límites comunales y está validada en términos de uso de suelo.

Es importante señalar que la estimación de la matriz de viajes del periodo Fuera de Punta Mañana se desarrolla a partir de las tablas de Etapas y Viajes del 31 de julio al 4 de agosto 2017. Esta tabla se obtiene de la versión de ADATRAP que estima bajada a nivel de día.

Para obtener la matriz base del modelo se selecciona todos los viajes con hora media entre 11:00 y 12:00 hrs. que contiene 165.498 viajes.

Considerando que cada uno de los procesos aplicados se realiza de forma independiente y sobre la matriz OD base FP, para incorporar todos los procesos se suma la diferencia de viajes producida en la aplicación de cada factor sobre el factor de expansión original de cada viaje proveniente de la tabla TB9, es decir:

$$V_{ij} = V_{ij_Base} + \Delta Evasi\acute{o}n_Parcial + \Delta Evasi\acute{o}n_Sistem\acute{a}tica + \Delta Boletos_Edmonson$$

La agregaci3n de todos los procesos genera una nueva matriz OD de viajes de FP. Si se compara la diferencia de viajes generados y atraídos a nivel de zona, entre la matriz actualizada y la matriz base, se obtiene diferencias de viajes por zona, como se muestra en la siguiente tabla:

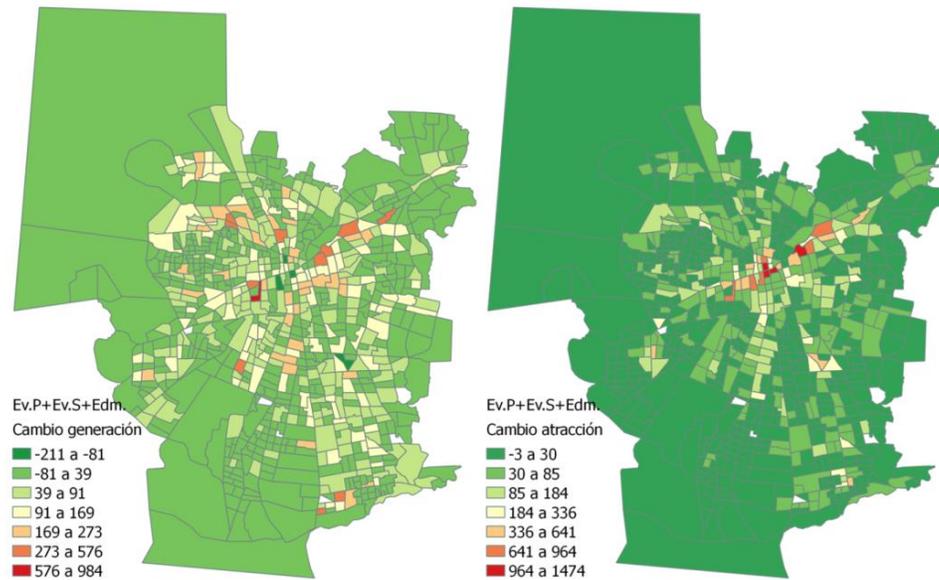
Tabla 10-3: Detalle de variaci3n de viajes por incorporaci3n de evasi3n parcial, sistemática y boletos Edmonson

Matriz	Comentario	Viajes adicionales	Total viajes matriz
Matriz Base	viajes con hora media entre 11 y 12 hrs.	-	165.498
Matriz Ev. Parcial	correcci3n de estructura, no incorpora viajes	0	165.498
Matriz Ev. Sistemática	correcci3n r/ matriz base	28.879	194.377
Matriz Edmonson	correcci3n r/ matriz base	15.880	181.378
Matriz Actualizada	correcci3n r/ matriz base, se calcula como suma de correcciones por zona	44.759	210.257

Fuente: Elaboraci3n Propia

Para visualizar espacialmente las modificaciones a la matriz, la siguiente imagen muestra la variaci3n de viajes a nivel de zona:

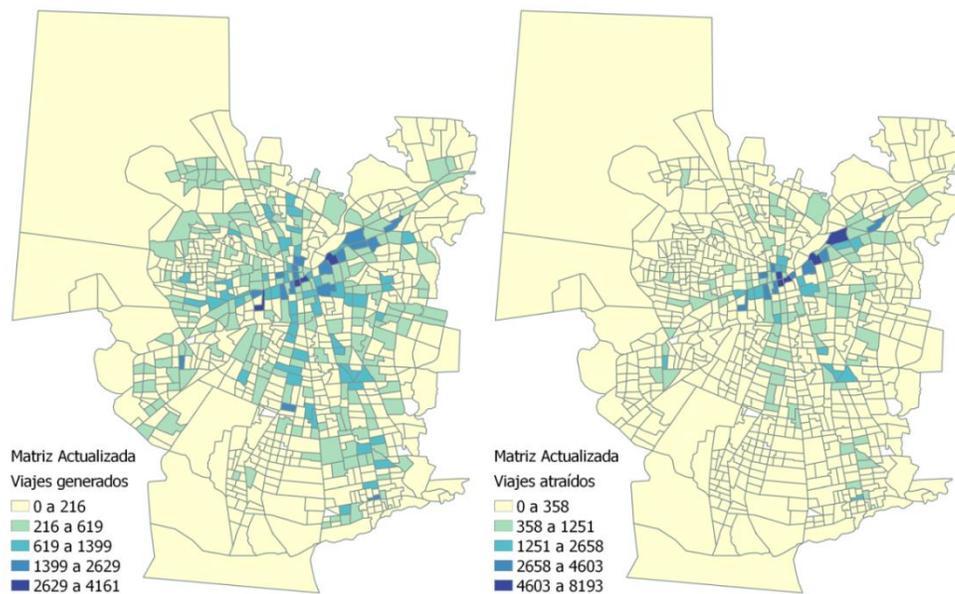
Figura 10-1: Variación de viajes generados (izquierda) y atraídos (derecha) a nivel de zona 777 por incorporación de evasión parcial, sistemática y boletos Edmonson



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, la siguiente figura muestra los viajes generados y atraídos en la matriz OD fuera de punta actualizada a nivel de zona 777:

Figura 10-2: Generación (izq) y atracción (der) de viajes a nivel de zona 777, matriz OD FP actualizada



Fuente: Elaboración Propia

Notar que las visualizaciones del informe se realizan a nivel de zona 777, pero que todos los factores de actualización de la matriz fueron aplicados directamente a nivel de viaje, razón por la cual se cuenta con una matriz desagregada a nivel de parada.

Al contar con la matriz actualizada a nivel de viaje, es posible analizar su composición en este mismo nivel de detalle. La matriz actualizada presenta una tasa de 1,34 etapas por viaje. La siguiente tabla muestra la cantidad de etapas por operador (contabilizadas hasta la 4ta etapa de viaje):

Tabla 10-4: Detalle de matriz actualizada, número de etapas de viaje por operador

UN	Datos Bips	Datos Estimados	Evasión Matriz	Evasión Ministerio 3° Trimestre 2017
U1	14.410	20.788	31%	30%
U2	20.345	28.254	28%	26%
U3	21.349	30.208	29%	28%
U4	23.527	30.387	23%	24%
U5	22.570	29.211	23%	22%
U6	11.805	15.243	23%	16%
U7	7.543	11.526	35%	42%
TOTAL BUS	122.794	167.281	27%	26%
SIN UNIDAD	1.244	1.663	25%	
METRO	96.944	112.824		
METROTREN	1.678	1.659		
TOTAL ETAPAS	221.415	281.764		
ETAPAS VIAJE		1,34		

Fuente: Elaboración Propia

La siguiente tabla muestra los transbordos observados entre tipos de transporte:

Tabla 10-5: Transbordos entre combinaciones de tipo de transporte

Etapa N	Etapa N+1	Trasbordos
BUS+ZP	BUS+ZP	20.342
BUS+ZP	METRO	38.574
BUS+ZP	METROTREN	244
METRO	BUS+ZP	11.299
METRO	METROTREN	205
METROTREN	BUS+ZP	67
METROTREN	METRO	776
TOTAL		71.507

Fuente: Elaboración Propia

Otra dimensión de análisis son los niveles de servicios por componente de tiempo de viaje para la matriz actualizada.

Tabla 10-6: Nivel de Servicio, matriz OD Punta Mañana

	Tiempos (Minutos)
Tiempo Caminata	0,42
Tiempo Espera	2,21
Tiempo vehículo	26,74
Tiempo de Viaje	29,38

Fuente: Elaboración Propia

Cabe mencionar que el tiempo de caminata solo considera las caminatas en los transbordos, pues la información de ADATRAP no contiene el acceso y egreso del viaje, por lo que el valor está intrínsecamente subestimado. Por otra parte, el valor de tiempo de espera también está subestimado, pues solo considera la espera en el transbordo, no incorporando la espera de la primera etapa.

11 CONSTRUCCIÓN MODELO FUERA DE PUNTA

La construcción el Modelo de asignación para fuera de punta se compone por los siguientes elementos:

- Definición de Modos
- Definición de tipos de vehículos
- Definición de arcos y nodos
 - Red vial/Metro/Metrotren
- Definición de zonas
- Definición de conectores
 - Zonas/Entre modos
- Definición de la matriz de viajes
- Definición de itinerarios servicios
 - Buses/ Metro/Metrotren
- Definición de velocidades
 - Buses/Metro/Metro tren
- Definición de Características Operacionales servicios buses, Metro y Metro tren
 - Frecuencia/Capacidad
- Definición de Parámetros de Modelación
- Definición Esquema Tarifario

El horario representativo del modelo FP corresponde entre las 11:00 a 12:00 hrs de un día laboral promedio.

A modo de resumen, el modelo construido se compone de la siguiente información:

Figura 11-1: Resumen Información Modelo de asignación



Fuente: Elaboración Propia

El modelo Fuera de Punta Mañana fue construido sobre la base de la red vial del modelo de Punta mañana, rescatando los elementos comunes en la vialidad e itinerarios, y modificando aquellos elementos y características que cambian en el periodo fuera de punta mañana.

Se procedió a generar un Proyecto en EMME® incorporando todos los elementos antes descritos en un escenario de modelación. Dicho escenario será considerado como el **Escenario Base**. Los resultados globales del Escenario se presentan a continuación:

Tabla 11-1: Resultados Globales

Ítem	Etapas Matriz Estimada Bips	Escenario Base	Variación % Esc Base/Datos Obs
Etapas Buses	167.281	190.608	14%
Etapas Metro	112.824	97.225	-14%
Etapas Metro (con transbordo metro metro)		100.379	
Total Etapas (sin transbordo metro metro)	280.105	287.833	3%
Matriz de viajes	210.150	210.150	0%
Etapas de viaje por Bip	1,33	1,43	7%
Etapas caminando	0	6.676	

Fuente: Proyecto DTPM EMME®

A continuación se presentan las etapas por Unidad de Negocio y los transbordos entre modos y entre Unidades de Negocio. La información de etapas es comparada con los datos observados, provenientes de la matriz estimada.

Tabla 11-2: Resultados Etapas por Unidad de Negocio

Etapas por UN	Etapas Matriz Estimada Bips	Escenario Base	Variación % Esc Base/Datos Obs
U1	20.788	23.479	13%
U2	28.254	35.916	27%
U3	30.208	31.545	4%
U4	30.387	37.844	25%
U5	29.211	33.883	16%
U6	15.243	16.185	6%
U7	11.526	11.764	2%

Fuente: Proyecto DTPM EMME®

Tabla 11-3: Transbordos entre Modos

Etapas Transbordo	Etapas Matriz Estimada Bips	Escenario Base	Variación % Esc Base/Datos Obs
Bus-Bus	20.342	22.345	10%
Bus-Metro	38.574	33.811	-12%
Metro-Metro		102.384	

Etapas Transbordo	Etapas Matriz Estimada Bips	Escenario Base	Variación % Esc Base/Datos Obs
Metro-Bus	11.299	9.309	-18%
Bus-Metrotren	244	446	83%
Metro-Metrotren	205	136	-34%
Metrotren-Bus	67	119	78%
Metrotren-Metro	776	740	-5%

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

Al analizar los resultados del modelo fuera de punta, se observa la necesidad de calibrar el modelo con parámetros propios. Por lo que en el próximo capítulo se aborda la calibración del modelo fuera de punta.

12 CALIBRACIÓN MODELO FUERA DE PUNTA

Similarmente a la punta mañana, se procedió a ajustar parámetros y la matriz por conteos. A continuación se presentan los principales resultados de la asignación de la matriz ajustada para el periodo fuera de punta mañana. Es importante recordar, que la asignación se realiza considerando la oferta ajustada por ICF, de manera de que la comparación con los datos observados sea más acorde.

Tabla 12-1: Parámetros de asignación escenarios de modelación

Definición de Parámetros	Escenario 8
Matriz	Matriz ajustada mf7
Valor del Tiempo (\$/min)	0,0857
Peso del Tiempo de Espera	2
Peso del Tiempo de Caminata	3
Peso del Tiempo de Abordaje	1
α (BPR función de hacinamiento)	2
β (BPR función de hacinamiento)	4
α (Intervalo de Espera – Modo Bus)	5
β (Intervalo de Espera – Modo Bus)	1,5
α (Intervalo de Espera – Modo Metro)	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metro)	2
α (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	1,5
β (Intervalo de Espera – Modo Metrotren)	2
Penalidad por Transbordo Metro	8
Penalidad por Transbordo Metrotren	8
Penalidad por Transbordo Bus	15
Penalidad por Abordar Bus Etapa 1	15
Penalidad por Abordar Metro Etapa 1	0

Fuente: Modelo EMME © DTPM 2011. *Actualizado a pesos 2017

A continuación se presentan los resultados globales del escenario de modelación.

Tabla 12-2: Resultados Globales

Ítem	Etapas Estimación de Bajada	Etapas Matriz a priori	Escenario 7 A Priori	Escenario 8 Ajustada	Variación Esc8-Etapas M.A priori
Etapas Buses	131.927	167.280	179.257	199.900	20%
Etapas Metro	92.290	112.824	100.462	108.721	-4%
Etapas Metro (con transbordo metro metro)	S/I	S/I	135.902	148.396	-
Total Etapas (sin transbordo metro metro)	225.798	281.764	282.007	311.119	10%
Matriz de viajes	165.498	210.150	210.150	226.263	8%
Etapas de viaje por Bip	1,36	1,34	1,52	1,54	15%
Etapas caminando	0	0	23.561	23.725	-

Fuente: Proyecto DTPM EMME ©

A continuación se presentan las etapas por Unidad de Negocio y los transbordos entre modos y entre Unidades de Negocio. La información de etapas es comparada con los datos observados, provenientes de la matriz construida.

Tabla 12-3: Resultados Etapas por Unidad de Negocio

Etapas por UN	Etapas Estimación de Bajada	Etapas Matriz a priori	Escenario 7 A Priori	Escenario 8 Ajustada	Variación Esc8-Etapas M.A priori
U1	15.526	20.788	21.513	23.146	11,3%
U2	21.257	28.254	29.111	33.180	17,4%
U3	22.182	30.208	34.876	37.933	25,6%
U4	25.428	30.387	29.445	34.277	12,8%
U5	23.782	29.211	32.124	35.468	21,4%
U6	13.589	15.243	20.119	22.395	46,9%
U7	7.817	11.526	12.069	13.501	17,1%
Sin UN	2.347	1.663	0	0	-

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

Se observa una sobreestimación de las etapas de viaje en la mayoría de las Unidades de negocio.

Tabla 12-4: Transbordos entre Modos

Etapas Transbordo	Etapas Matriz a priori	Escenario 7 A Priori	Escenario 8 Ajustada	Variación Esc8-Etapas M.A priori
Bus-Bus	20.342	29.487	33.551	64,9%
Bus-Metro	38.574	32.944	38.457	0%
Metro-Metro	S/I	35.440	39.675	-
Metro-Bus	11.299	31.141	34.446	205%
Bus-Metrotren	244	761	847	247%
Metro-Metrotren	205	262	280	37%
Metrotren-Bus	67	495	595	794%
Metrotren-Metro	776	1.166	1.247	61%

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

13 ESCENARIOS FUERA DE PUNTA MAÑANA

A continuación se describen los escenarios modelados correspondientes al periodo Fuera de Punta, que son reportados en el presente capítulo.

- **E4: Escenario JULIO 2018 FP:** este escenario considera la actualización de la oferta de buses (trazados, frecuencia y capacidad), según el Plan Operacional del mes de Julio 2018 en el periodo Fuera de Punta. Además, fueron actualizadas las características de operación de Metro a la misma fecha, incorporando a la red la operación de la Línea 6 y ajustando la oferta, capacidad y tiempos entre estaciones del resto de las líneas en dicho periodo.
- **E5: E4 + L3 + INDEPENDENCIA:** Sobre el **E4**, se incorpora la operación de la Línea 3, manteniendo las condiciones operacionales relativas al PO Julio 2018 para todo el sistema, excepto en el eje Independencia, entre Dorsal y Santa María, tramo en el que fueron modificadas las condiciones operacionales a las de un corredor, ajustando también los itinerarios de los servicios de buses que circulan por dicho eje.
- **E6: E5 + Ajuste de Malla por L3:** Sobre el escenario **E5**, se incorporan ajustes a la malla de buses (trazados, frecuencias y capacidad) que corresponden a propuestas para mejorar la malla de buses producto de la entrada en operación de la Línea 3 de Metro.

En ninguno de los escenarios se consideran cambios en las características operacionales de Metrotren, ni tampoco cambio masivo de velocidades de buses en la red de modelación, respecto a lo incorporado inicialmente al modelo. Respecto a la matriz de demanda, esta corresponde a la ajustada en el capítulo previo. Esta matriz corresponde al mes de Agosto del 2017 ajustada por conteos.

Los resultados de la asignación de los escenarios analizados, se presentan a continuación:

Tabla 13-1: Resultados Globales

Ítem	PO Mayo 17	PO Julio 18+L6	PO Julio 18+L6+L3	E6 – juste Malla L3
Etapas Buses	267.200	252.990	245.811	242.834
Etapas Metro	96.641	114.597	121.932	123.612
Etapas Metro (con transbordo Metro Metro)	131.539	160.767	169.642	173.401
Total Etapas (sin transbordo Metro Metro)	365.820	370.727	370.908	369.689
Matriz de viajes	226.263	226.263	226.263	226.263
Etapas Bip por Viaje	1,71	1,73	1,73	1,73
Etapas caminando	10.969	11.383	11.371	11.456

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

Al analizar los escenarios PO Mayo 2017 y PO Julio 18+L6, se observa un aumento en las etapas de metro y una disminución de las etapas de buses, principalmente explicado por la incorporación de la Línea 6. Por otro lado, existe un aumento en las etapas totales y en las Etapas Bip por Viaje.

Al comparar el escenario PO Julio18+L6+L3 con el escenario PO Julio18+L6, se observa un aumento en las etapas de metro y una disminución en las etapas de buses, explicado principalmente por la incorporación de la Línea 3 al sistema. Por otro lado las etapas totales se mantienen prácticamente invariantes, al igual que las Etapas Bip por Viaje. Por lo que las variaciones reportadas se pueden suponer como un cambio modal en viajes que antes se realizaban solo en bus, que con la nueva Línea 3 se pueden realizar solo en Metro.

Al analizar el escenario E6 – Ajuste Malla L3 con el escenario PO Julio18 + L6+L3, se observa una disminución en las etapas de buses y un aumento en las etapas de metro, consistente con los ajustes propuestos para los servicios de buses. Por otro lado, el total de etapas disminuye levemente, mientras que las etapas por viaje se mantienen.

A continuación se presentan las etapas por Unidad de Negocio de los escenarios analizados.

Tabla 13-2: Resultados Etapas por Unidad de Negocio

Etapas por UN	PO Mayo 17	PO Julio 18 + L6	PO Julio 18 + L6 + L3	E6 – Ajuste Malla L3
U1	31.206	28.809	28.605	27.458
U2	46.712	43.717	42.052	39.592
U3	49.957	47.126	45.613	45.845
U4	48.009	46.394	44.836	44.643
U5	46.782	44.287	42.456	42.037
U6	27.709	26.515	26.129	26.773
U7	16.825	16.142	16.120	16.486
Sin UN	0	0	0	0

Fuente: Proyecto DTPM EMME ®

Al analizar el PO Julio 18 + L6, se observa que la baja a nivel de etapas de bus, es generalizada por Unidad de Negocio. Sin perjuicio de esto se observa que el 75% de la pérdida se concentra en las Unidades 1, 3 y 5.

Las etapas por Unidad de Negocio del escenario PO Julio 18 + L6 + L3 presentan una baja generalizada y uniforme en las etapas por unidad de negocio, respecto al escenario PO Julio 18+L6. Sin embargo, es importante mencionar que las UN2, UN3, UN4 y UN5 tienen un impacto homogéneo cercano al -4%. En el resto de las unidades de negocio el impacto es marginal. Por su parte, el escenario E6 – Ajuste Malla L3 comparado con el escenario PO Julio 18 + L6 + L3, presenta una baja a nivel de etapas de bus concentrada en las UN1 y UN2, con una disminución del 4% y 5%, respectivamente.

La siguiente tabla presenta los transbordos entre modos, de los escenarios analizados.

Tabla 13-3: Transbordos entre Modos

Etapas Transbordo	PO Mayo 17	PO Julio 18 + L6	PO Julio 18 + L6 + L3	E6 – Ajuste Malla L3
Bus-Bus	67.622	52.032	46.741	46.170
Bus-Metro	42.380	52.791	55.162	54.854
Metro-Metro	34.898	46.170	47.710	49.789
Metro-Bus	38.968	47.462	50.521	50.143
Bus-Metrotren	891	1.622	1.631	1.666
Metro-Metrotren	182	351	357	368
Metrotren-Bus	545	684	686	704
Metrotren-Metro	922	1.792	1.813	1.868

Fuente: Proyecto DTPM EMME ©

Al analizar los escenarios PO Julio 18 + L6 y PO Mayo 17, se observa que los transbordos entre modos que involucran a Metro aumentan y disminuyen solo los transbordos bus-bus. Todo esto consistente con la incorporación de la Línea 6 y el consecuente aumento de capacidad disponible en toda la red de Metro, por la redistribución de flujos de pasajero en las distintas líneas. Cabe señalar, que la disminución de los transbordos bus-bus es menor que el aumento de los transbordos bus-metro y metro-bus, lo que explica en parte el aumento de las etapas por viaje.

Al analizar los escenarios PO Julio 18 + L6 + L3 y PO Julio 18 + L6, se observa que los transbordos entre modos que involucran a Metro aumentan y el resto disminuye. Todo esto consistente con la incorporación de la Línea 3. Sin embargo, a diferencia del escenario en el que se incorpora la Línea 6 de Metro, no aumentan las etapas bip por viaje y de acuerdo a los cambios registrados en los transbordos, la disminución de los transbordos bus-bus es igual al aumento de los transbordos bus-metro más metro-bus. Por su parte, en el escenario E6 – Ajuste Malla L3 no se observan variaciones importantes en los transbordos entre modos. Sin embargo destaca la disminución de los transbordos bus-bus y bus-metro.

14 ESTIMACION DE LA MATRIZ DE VIAJES L6

El objetivo de esta tarea es estimar matrices de viajes que permitan representar de la mejor forma posible la demanda real y el comportamiento de los usuarios del STPS en los periodos Punta Mañana y Fuera Punta Mañana. La diferencia de las matrices que se presentan en este capítulo con las que ya se han reportado los resultados de calibración y evaluaciones de escenarios en este estudio, es que las estimadas en este acápite tienen incorporados los viajes realizados en la Línea 6 de Metro.

Para cumplir con este objetivo ha sido necesario utilizar las Tablas de Etapas y de Viajes de noviembre de 2017, disponibilizadas por DTPM, además de la información de evasión (se utilizó la misma que en la estimación de la matriz agosto 2017) y los boletos Edmonson de Metro, actualizados para el corte temporal octubre 2017.

La estimación de la matriz OD se compone de 3 procesos y todos ellos se basan en la Tabla de Viajes, a la cual se le aplican transformaciones de estructura y/o factores de corrección según indique la información adicional. Los procesos aplicados son:

- Incorporación de evasión parcial a partir de la información contenida en la EOD de Metro de 2017
- Incorporación de evasión sistemática a partir de datos de mediciones de evasión realizadas por fiscalización durante el año 2016, y de mediciones de perfiles de carga realizadas por DICTUC el año 2012
- Incorporación de boletos Edmonson de Metro, para agregar a la matriz todos aquellos viajes realizados en Metro y pagados con boletos Edmonson y no con tarjeta bip!

La metodología de cada uno de estos procesos se explicó en el capítulo 6 de este informe y se aplica de manera independiente, para revisar el impacto de cada proceso sobre la matriz obtenida de la tabla de viajes.

La matriz OD de fuera punta se obtiene de la suma de las modificaciones o matrices generadas en cada paso. Adicionalmente a estos tres pasos, a la matriz de punta mañana se le debe realizar un proceso previo a los tres ya mencionados, y que tiene que ver con la obtención de matriz de bips!

En este capítulo se presenta en primer lugar un análisis de los datos de entrada, que incorpora una descripción de las tablas de viajes y etapas de noviembre de 2017, de la encuesta Origen Destino de Metro de 2017, y de los datos de boletos Edmonson de octubre de 2017. A continuación se presenta la matriz de viajes L6 de punta mañana, con sus principales resultados y la comparación de estos con los de agosto de 2017. Finalmente, se presentan los principales resultados de la matriz de viajes L6 de fuera de punta y su comparación con la matriz de agosto de 2017.

14.1 ESTIMACIÓN DE MATRIZ DE VIAJES L6 PUNTA MAÑANA

Considerando que cada uno de los procesos aplicados se realiza de forma independiente y sobre la matriz OD base PM, para incorporar todos los procesos se suma la diferencia de viajes producida en la aplicación de cada factor sobre el factor de expansión original de cada viaje proveniente de la tabla TB9, es decir:

$$V_{ij} = V_{ij_Base} + \Delta Evasi\acute{o}n_Parcial + \Delta Evasi\acute{o}n_Sistem\acute{a}tica + \Delta Boletos_Edmonson$$

La agregaci3n de todos los procesos genera una nueva matriz OD de viajes de PM. Si se comparara la diferencia de viajes generados y atraídos a nivel de zona, entre la matriz actualizada y la matriz base, se obtiene diferencias de viajes por zona, como se muestra en la siguiente tabla.

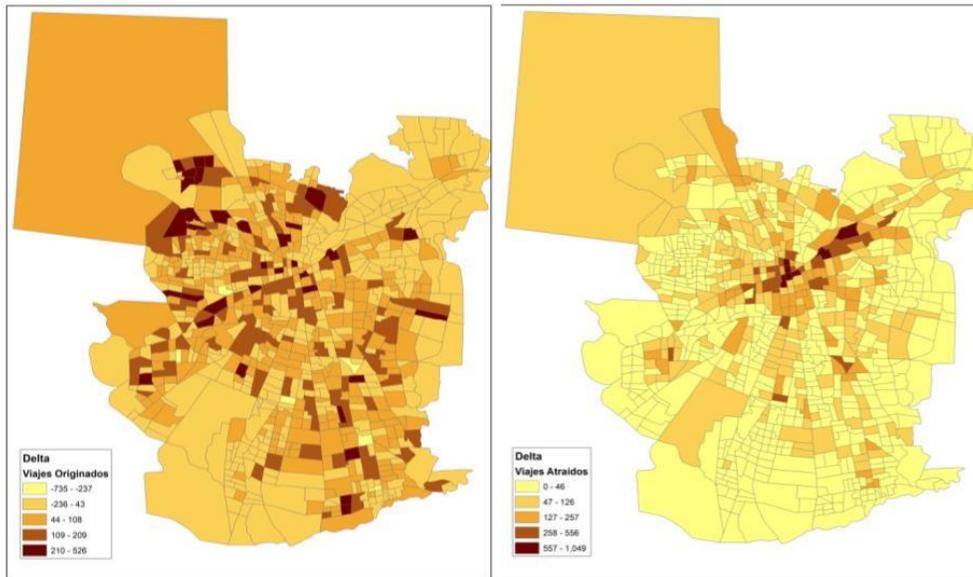
Tabla 14-1: Detalle de variaci3n de viajes por incorporaci3n de evasi3n parcial, sistemática y boletos Edmonson

Matriz	Comentario	Viajes adicionales	Total viajes matriz
Matriz Base	Correcci3n por zona	-	435.477
Matriz Ev. Parcial	Correcci3n de estructura, no incorpora viajes	0	435.477
Matriz Ev. Sistemática	Correcci3n r/ matriz base	41.675	477.152
Matriz Edmonson	Correcci3n r/ matriz base	7.837	443.314
Matriz Actualizada	Correcci3n r/ matriz base, se calcula como suma de correcciones por zona	49.512	484.990

Fuente: Elaboraci3n Propia

Para visualizar espacialmente las modificaciones a la matriz, la siguiente imagen muestra la variaci3n de viajes a nivel de zona.

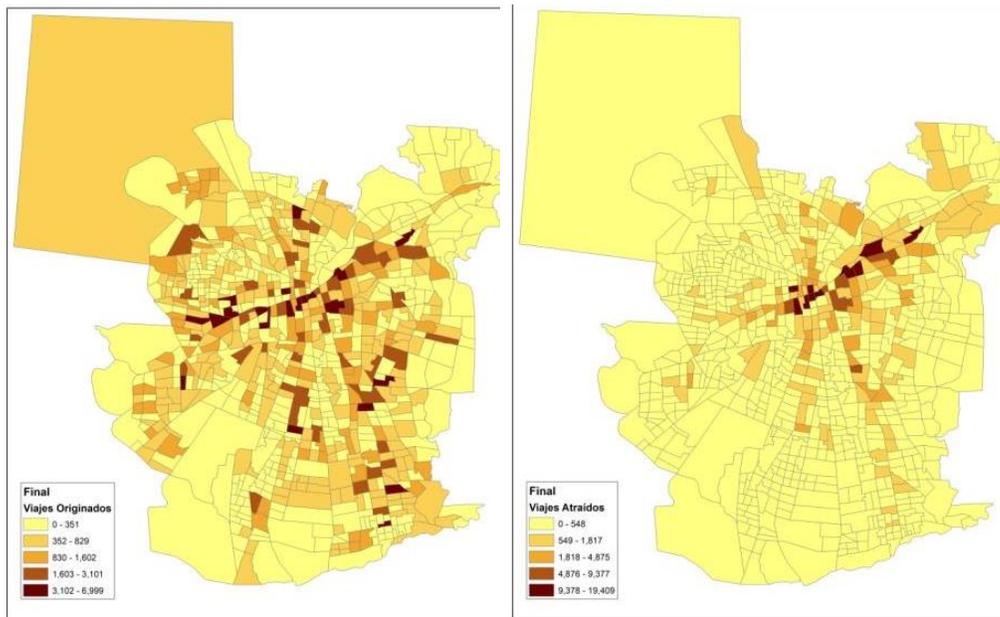
Figura 14-1: Variación de viajes generados (izquierda) y atraídos (derecha) a nivel de zona 777 por incorporación de evasión parcial, sistemática y boletos Edmonson



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la siguiente figura muestra los viajes generados y atraídos en la matriz OD fuera de punta actualizada a nivel de zona 777.

Figura 14-2: Generación (izq) y atracción (der) de viajes a nivel de zona 777, matriz OD PM actualizada



Fuente: Elaboración Propia

Notar que las visualizaciones del informe se realizan a nivel de zona 777, pero que todos los factores de actualización de la matriz fueron aplicados directamente a nivel de viaje, razón por la cual se cuenta con una matriz desagregada a nivel de parada.

Al contar con la matriz PM de noviembre actualizada a nivel de viaje, es posible analizar su composición en este mismo nivel de detalle. La matriz actualizada presenta una tasa de 1,42 etapas por viaje. La siguiente tabla muestra la cantidad de etapas por operador (contabilizadas hasta la 4ta etapa de viaje):

Tabla 14-2: Detalle de matriz actualizada, número de etapas de viaje por operador

UN	Datos Bips	Datos Estimados	Evasion Matriz	Evasion Ministerio 3° Trimestre 2017
U1	35.214	42.501	17%	31%
U2	56.574	68.073	17%	25%
U3	59.406	71.920	17%	23%
U4	53.812	62.690	14%	25%
U5	56.537	67.050	16%	22%
U6	31.005	35.992	14%	11%
U7	23.589	28.435	17%	29%
Total Bus	320.325	381.523	16%	24%
Sin Unidad	4.187	4.861	14%	
Metro	293.496	301.333	3%	
Metrotren	6.770	6.769	0%	
Total Etapas	620.591	689.625	10%	
Etapas Viaje		1,42		

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la evasión introducida por Unidad de Negocio es sistemáticamente menor que la reportada por el Ministerio, con excepción de la UN6.

En la misma línea, también es posible calcular los transbordos observados entre tipos de transporte, lo que se reporta en la tabla siguiente.

Tabla 14-3: Transbordos entre combinaciones de tipo de transporte

Etapas N	Etapas N+1	Trasbordos Nov2017
Bus+Zp	BUS+ZP	53.301
Bus+Zp	METRO	114.361
Bus+Zp	METROTREN	1.386
Metro	BUS+ZP	30.768
Metro	METROTREN	401
Metrotren	BUS+ZP	519
Metrotren	METRO	3.899
Total		204.636

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el total de transbordos es casi de 205 mil, donde la gran mayoría se realiza entre Bus y Metro (56%), seguido por los realizados entre Bus y Bus (26%).

A continuación se presenta una comparación de los principales resultados de las matrices de punta mañana de agosto de 2017 (reportada en el Capítulo 6 de este informe), y de noviembre de 2017 (L6).

En la siguiente tabla se observa el número de viajes observados, expandidos y totales de ambas matrices, además de las diferencias aplicadas por conceptos de incorporación de evasión y de boletos Edmonson.

Tabla 14-4: Viajes de matrices PM agosto 2017 y noviembre 2017

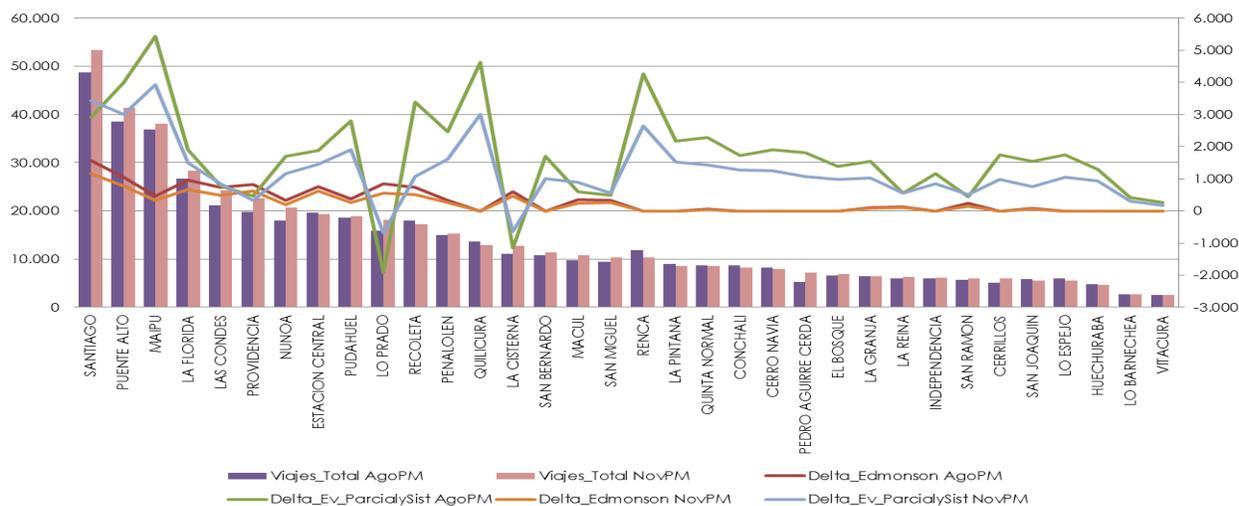
PM	PM Ago 2017	PM Nov 2017	Δ %
Viajes Obs	285.758	324.923	14%
Viajes Expandidos	391.110	435.477	11%
Viajes_Corr_Ev_Parcial_Ini	391.110	435.477	11%
Viajes_Corr_Ev_Sist	449.410	477.152	6%
Viajes_Corr_Edmonson	401.944	443.314	10%
Viajes_Corr_Ev_ParcialySist	449.410	477.152	6%
Delta_Edmonson	10.835	7.837	-28%
Delta_Ev_ParcialySist	58.300	41.675	-29%
Viajes_Total	460.245	484.990	5%

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver que el número total de viajes aumentó un 5% en noviembre con respecto a agosto, y que tanto los viajes incorporados por evasión sistemática y parcial, como los incorporados por boletos Edmonson disminuyeron un 29% y un 28%, respectivamente.

En la siguiente figura se muestra en barras, los viajes totales de agosto 2017 y de noviembre de 2017 por comuna, y en líneas, las diferencias de viajes agregados por evasión y por boletos en ambas matrices.

Figura 14-3: Viajes PM totales y deltas edmonson y evasión por comuna, para agosto 2017 y noviembre 2017



Fuente: Elaboración propia

En 23 de las 34 comunas el número de viajes aumenta en noviembre con respecto a agosto, siendo las comunas de Pedro Aguirre Cerda y Cerrillos las que presentan un mayor incremento porcentual, con un 38% y un 16%, respectivamente. En las 11 comunas restantes, el número total de viajes de noviembre es menor al de agosto. En estos casos, a pesar de que inicialmente los viajes observados fueron mayores en noviembre a los de agosto, los deltas de evasión y de boletos edmonson son menores en noviembre, lo que genera la diferencia. Las comunas de Renca y Lo Espejo presentan las mayores diferencias porcentuales, con 13% y 9% menos de viajes en noviembre.

A continuación se presenta una tabla con la comparación del número de etapas de viaje por operados para las matrices de agosto 2017 y noviembre 2017.

Tabla 14-5: Comparación del número de etapas de viaje por operador, matrices agosto 2017 y noviembre 2017, PM

UN	Datos Bips Ago2017	Datos Estimados Ago2017	Datos Bips Nov2017	Datos Estimados Nov2017	Δ Datos Bips	Δ Datos Observados
U1	34.232	46.416	35.214	42.501	3%	-8%
U2	53.148	70.136	56.574	68.073	6%	-3%
U3	54.350	73.731	59.406	71.920	9%	-2%
U4	51.707	65.762	53.812	62.690	4%	-5%
U5	54.895	70.585	56.537	67.050	3%	-5%
U6	31.773	39.729	31.005	35.992	-2%	-9%
U7	21.343	27.498	23.589	28.435	11%	3%
Total Bus	305.077	398.479	320.325	381.523	5%	-4%
Sin Unidad	3.629	4.624	4.187	4.861	15%	5%
Metro	265.159	275.993	293.496	301.333	11%	9%
Metrotren	4.899	4.898	6.770	6.769	38%	38%
Total Etapas	575.134	679.371	620.591	689.625	8%	2%
Etapas Viaje		1,48		1,42		

Fuente: Elaboración propia

Se observa que en la matriz de noviembre el número de etapas correspondientes a datos bips es mayor con respecto a agosto para todos los operadores, salvo para la Unidad de Negocios 6. Por otro lado, el número de etapas que corresponden a datos observados de noviembre es menor con respecto a agosto para todos los operadores de bus. Esto se debe a que los deltas correspondientes a evasión sistemática son menores en noviembre.

Por otro lado, se observa que las etapas de viaje totales en Metrotren presentan un gran aumento en noviembre (38%), y que existe un 9% más de etapas de viaje en Metro en noviembre, lo que se podría explicar por la implementación de la línea 6.

Por último, se puede ver que en el global, el número de etapas de viaje totales aumenta un 2% en la matriz de noviembre con respecto a la de agosto, y que el número de etapas por viaje pasa de un 1,48 a un 1,42.

Finalmente, en la siguiente tabla se presenta la comparación del número de trasbordos entre combinaciones de tipos de transporte de las matrices de noviembre y agosto 2017.

Tabla 14-6: Comparación entre el número de transbordos entre combinaciones de tipo de transporte de noviembre y agosto 2017, PM

Etapa N	Etapa N+1	Trasbordos Nov2017	Trasbordos Ago2017	Δ %
Bus+Zp	Bus+Zp	53.301	59.327	-10%
Bus+Zp	Metro	114.361	117.261	-2%
Bus+Zp	Metrotren	1.386	957	45%
Metro	Bus+Zp	30.768	37.459	-18%
Metro	Metrotren	401	239	68%
Metrotren	Bus+Zp	519	539	-4%
Metrotren	Metro	3.899	3.345	17%
Total		204.636	219.126	-7%

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el número total de transbordos es un 7% menor en noviembre con respecto a agosto, pero que en casos donde el transbordo se realiza entre Metrotren y algún otro tipo de transporte, el número de transbordos es mayor en noviembre, salvo en aquellos donde el transbordo es entre Metrotren y Bus.

14.2 ESTIMACIÓN DE MATRIZ DE VIAJES L6 FUERA DE PUNTA

Considerando que cada uno de los procesos aplicados se realiza de forma independiente y sobre la matriz OD base FP, para incorporar todos los procesos se suma la diferencia de viajes producida en la aplicación de cada factor sobre el factor de expansión original de cada viaje proveniente de la tabla TB9, es decir:

$$V_{ij} = V_{ij_Base} + \Delta Evasión_Parcial + \Delta Evasión_Sistemática + \Delta Boletos_Edmonson$$

La agregación de todos los procesos genera una nueva matriz OD de viajes de FP. Si se comparara la diferencia de viajes generados y atraídos a nivel de zona, entre la matriz actualizada y la matriz base, se obtiene diferencias de viajes por zona, como se muestra en la siguiente tabla.

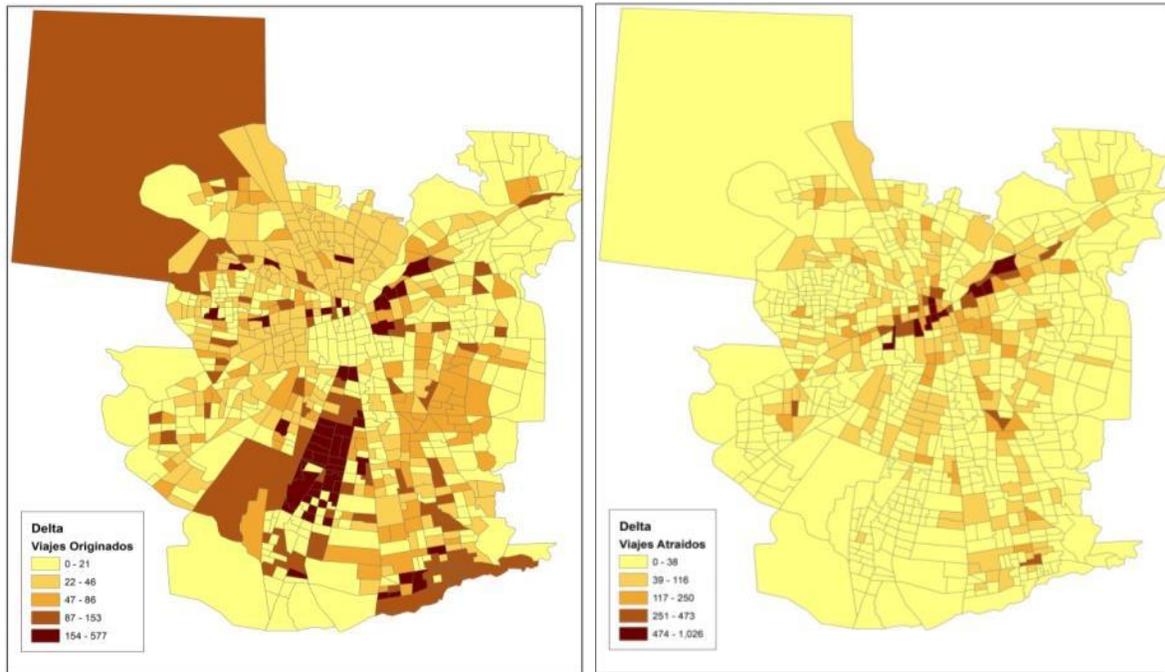
Tabla 14-7: Detalle de variación de viajes por incorporación de evasión parcial, sistemática y boletos Edmonson

Matriz	Comentario	Viajes adicionales	Total viajes matriz
Matriz Base	viajes con hora media entre 11 y 12 hrs.	-	188.009
Matriz Ev. Parcial	corrección de estructura, no incorpora viajes	0	188.009
Matriz Ev. Sistemática	corrección r/ matriz base	24.833	212.842
Matriz Edmonson	corrección r/ matriz base	12.339	200.348
Matriz Actualizada	corrección r/ matriz base, se calcula como suma de correcciones por zona	37.172	210.257

Fuente: Elaboración propia

Para visualizar espacialmente las modificaciones a la matriz, la siguiente imagen muestra la variación de viajes a nivel de zona.

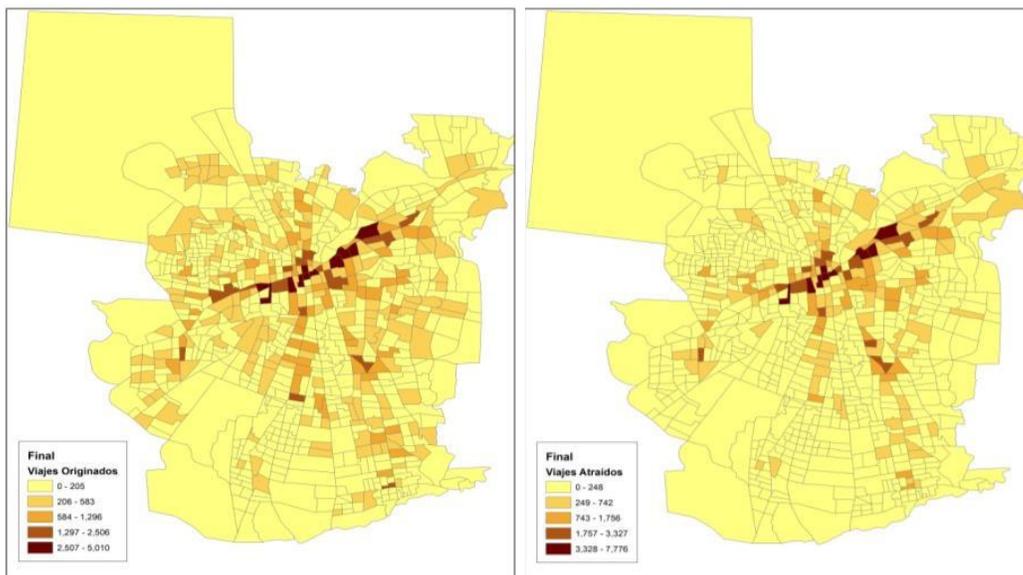
Figura 14-4: Variación de viajes generados (izquierda) y atraídos (derecha) a nivel de zona 777 por incorporación de evasión parcial, sistemática y boletos Edmonson



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, la siguiente figura muestra los viajes generados y atraídos en la matriz OD fuera de punta actualizada a nivel de zona 777.

Figura 14-5: Generación (izq) y atracción (der) de viajes a nivel de zona 777, matriz OD FP actualizada



Fuente: Elaboración propia

Notar que las visualizaciones del informe se realizan a nivel de zona 777, pero que todos los factores de actualización de la matriz fueron aplicados directamente a nivel de viaje, razón por la cual se cuenta con una matriz desagregada a nivel de parada.

Al contar con la matriz de FP de noviembre actualizada a nivel de viaje, es posible analizar su composición en este mismo nivel de detalle. La matriz actualizada presenta una tasa de 1,27 etapas por viaje. La siguiente tabla muestra la cantidad de etapas por operador (contabilizadas hasta la 4ta etapa de viaje):

Tabla 14-8: Detalle de matriz FP noviembre actualizada, número de etapas de viaje por operador

UN	DATOS BIPS	DATOS ESTIMADOS	EVASION MATRIZ	EVASION MINISTERIO 3° TRIMESTRE 2017
U1	14.997	19.319	22%	31%
U2	21.306	26.600	20%	25%
U3	22.492	28.241	20%	23%
U4	24.834	30.178	18%	25%
U5	23.611	28.333	17%	22%
U6	12.585	15.127	17%	11%
U7	8.154	11.151	27%	29%
TOTAL BUS	129.229	160.470	19%	24%
SIN UNIDAD	1.250	1.521	18%	
METRO	109.867	122.206	10%	
METROTREN	2.306	2.303	0%	
TOTAL ETAPAS	241.402	284.979	15%	
ETAPAS VIAJE		1,27		

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la evasión introducida por la Unidad de Negocio es sistemáticamente menor que la reportada por el Ministerio, con excepción de la UN6, consistente con lo reportado en la matriz PM.

En la misma línea, también es posible calcular los transbordos observados entre tipos de transporte, lo que se reporta en la tabla siguiente.

Tabla 14-9: Transbordos entre combinaciones de tipo de transporte

ETAPA N	ETAPA N+1	TRASBORDOS NOV2017
METRO	METROTREN	396
METRO	BUS+ZP	9.990
METROTREN	METRO	900
METROTREN	BUS+ZP	102
BUS+ZP	METRO	29.569
BUS+ZP	METROTREN	329
BUS+ZP	BUS+ZP	18.512
TOTAL		59.798

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el total de transbordos es casi de 60 mil, donde la gran mayoría se realiza entre Bus y Metro (49%), seguido por los realizados entre Bus y Bus (31%).

A continuación se presenta una comparación de los principales resultados de las matrices de fuera de punta de agosto de 2017 (reportada en el Capítulo 11 de este informe), y de noviembre de 2017 (L6).

En la siguiente tabla se observa el número de viajes observados, expandidos y totales de ambas matrices, además de los deltas aplicados por conceptos de incorporación de evasión y de boletos Edmonson.

Tabla 14-10: Viajes de matrices FP agosto 2017 y noviembre 2017

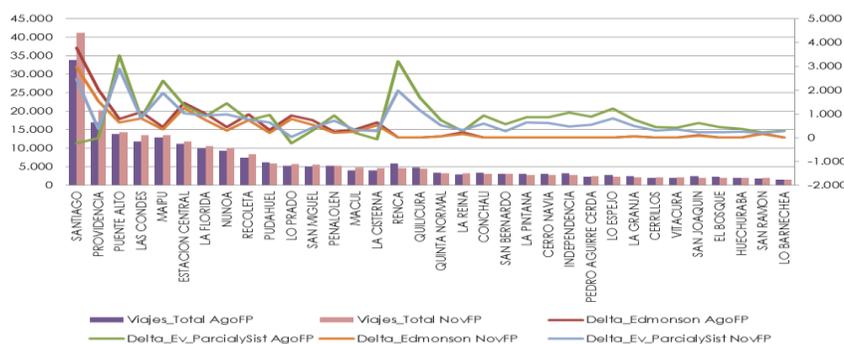
FP	FP Ago 2017	FP Nov 2017	Δ %
Viajes Obs	123.399	144.228	17%
Viajes Expandidos	165.498	188.009	14%
Viajes_Corr_Ev_Parcial_Ini	165.498	188.009	14%
Viajes_Corr_Ev_Sist	194.377	212.842	10%
Viajes_Corr_Edmonson	181.378	200.348	10%
Viajes_Corr_Ev_ParcialySist	194.377	212.842	10%
Delta_Edmonson	15.880	12.339	-22%
Delta_Ev_ParcialySist	28.879	24.833	-14%
Viajes_Total	210.257	225.182	7%

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver que el número total de viajes aumentó un 7% en noviembre con respecto a agosto, y que tanto los viajes incorporados por evasión sistemática y parcial, como los incorporados por boletos Edmonson disminuyeron un 22% y un 14%, respectivamente.

En la siguiente figura se muestra en barras, los viajes totales de agosto 2017 y de noviembre de 2017 por comuna, y en líneas, los deltas de viajes agregados por evasión y por boletos en ambas matrices.

Figura 14-6: Viajes FP totales y deltas edmonson y evasión por comuna, para agosto 2017 y noviembre 2017



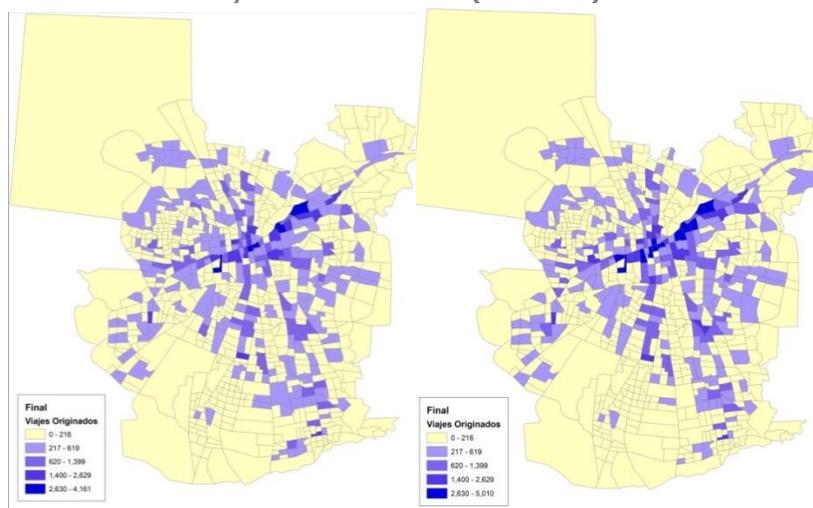
Fuente: Elaboración propia

En 21 de las 34 comunas el número de viajes aumenta en noviembre con respecto a agosto, siendo las comunas de Santiago y Providencia las que presentan un mayor incremento porcentual, con un 22% y un 20%. En las 13 comunas restantes, el número total de viajes de noviembre es menor al de agosto. En estos casos, a pesar de que inicialmente los viajes observados fueron mayores en noviembre a los de agosto, los deltas de evasión y de boletos edmonson son menores en noviembre, lo que genera la diferencia. Las comunas de Renca,

Independencia y Lo Espejo presentan los mayores diferencias porcentuales, con 22%, 17% y 17% menos de viaje en noviembre.

En la siguiente figura se presentan los viajes totales generados a nivel de zona 777 en las matrices OD fuera de punta de agosto y noviembre de 2017.

Figura 14-7: Generación de viajes a nivel de zona 777, matriz OD FP Agosto 2017 (izquierda) y Noviembre 2017 (derecha)

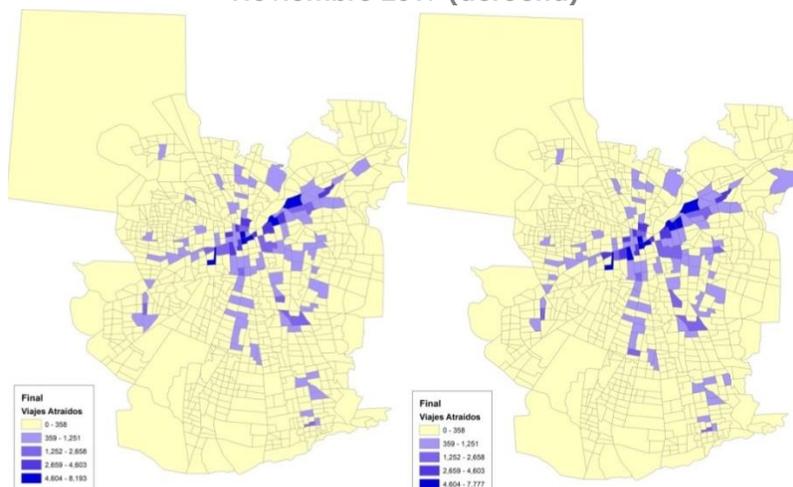


Fuente: Elaboración propia

Se observa que la estructura de viajes no varía mayormente entre ambas matrices, pero que los totales de noviembre son mayores. Se puede ver que el menor número de viajes se origina en la periferia, y que la mayor concentración de viajes se origina en torno al eje Alameda-Providencia-Apoquindo.

En la siguiente figura se presentan los viajes totales atraídos a nivel de zona 777 en las matrices OD fuera de punta de agosto y noviembre de 2017.

Figura 14-8: Atracción de viajes a nivel de zona 777, matriz OD FP Agosto 2017 (izquierda) y Noviembre 2017 (derecha)



Fuente: Elaboración propia

Se observa que la estructura de viajes no varía mayormente entre ambas matrices, pero que los totales de noviembre son mayores. Se puede ver que las zonas que atraen un mayor número de viajes se encuentran en torno al eje Alameda-Providencia-Apoquindo, y que la periferia de la ciudad atrae muy pocos viajes.

A continuación se presenta una tabla con la comparación del número de etapas de viaje por operadores para las matrices de agosto 2017 y noviembre 2017.

Tabla 14-11: Comparación del número de etapas de viaje por operador, matrices agosto 2017 y noviembre 2017, FP

UN	DATOS BIPS AGO2017	DATOS ESTIMADOS AGO2017	DATOS BIPS NOV2017	DATOS ESTIMADOS NOV2017	Δ DATOS BIPS	Δ DATOS OBSERVADOS
U1	14.410	20.788	14.997	19.319	4%	-7%
U2	20.345	28.254	21.306	26.600	5%	-6%
U3	21.349	30.208	22.492	28.241	5%	-7%
U4	23.527	30.387	24.834	30.178	6%	-1%
U5	22.570	29.211	23.611	28.333	5%	-3%
U6	11.805	15.243	12.585	15.127	7%	-1%
U7	7.543	11.526	8.154	11.151	8%	-3%
TOTAL BUS	122.794	167.281	129.229	160.470	5%	-4%
SIN UNIDAD	1.244	1.663	1.250	1.521	0%	-9%
METRO	96.944	112.824	109.867	122.206	13%	8%
METROTREN	1.678	1.659	2.306	2.303	37%	39%
TOTAL ETAPAS	221.415	281.764	241.402	284.979	9%	1%
ETAPAS VIAJE	1,34		1,27			

Fuente: Elaboración propia

Se observa que en la matriz de noviembre el número de etapas correspondientes a datos bips es mayor con respecto a agosto para todos los operadores, pero el número de etapas que corresponden a datos observados de noviembre es menor con respecto a agosto para

todos los operadores de buses. Esto se debe a que los deltas correspondientes a evasión sistemática son menores en noviembre.

Por otro lado, se observa que las etapas de viaje totales en Metrotren presentan un gran aumento en noviembre (39%), y que existe un 8% más de etapas de viaje en Metro en noviembre, lo que se podría explicar por la implementación de la línea 6.

Por último se puede ver que en el global, el número de etapas de viaje totales aumenta un 1% en la matriz de noviembre con respecto a la de agosto, y que el número de etapas por viaje pasa de un 1,34 a un 1,27.

Finalmente, en la siguiente tabla se presenta la comparación del número de trasbordos entre combinaciones de tipos de transporte de las matrices de noviembre y agosto 2017.

Tabla 14-12: Comparación entre el número de trasbordos entre combinaciones de tipo de transporte de noviembre y agosto 2017, FP

ETAPA N	ETAPA N+1	TRASBORDOS NOV2017	TRASBORDOS AGO2017	Δ %
METRO	METROTREN	396	205	93%
METRO	BUS+ZP	9.990	11.299	-12%
METROTREN	METRO	900	776	16%
METROTREN	BUS+ZP	102	67	53%
BUS+ZP	METRO	29.569	38.574	-23%
BUS+ZP	METROTREN	329	244	35%
BUS+ZP	BUS+ZP	18.512	20.342	-9%
TOTAL		59.798	71.507	-16%

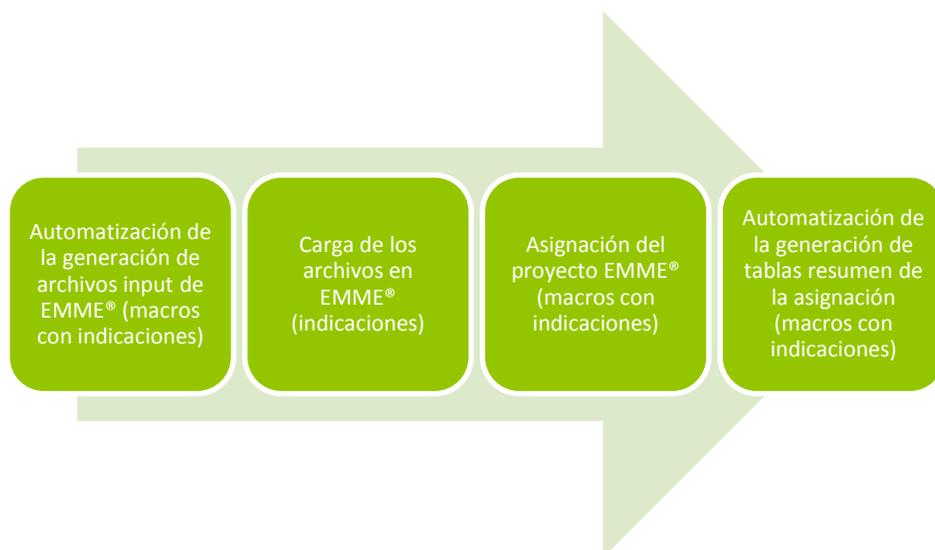
Fuente: Elaboración propia

Se observa que el número total de trasbordos es un 16% menor en noviembre con respecto a agosto, pero que en casos donde el trasbordo se realiza entre Metrotren y algún otro tipo de transporte, el número de trasbordos es mayor en noviembre.

15 MODIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Con el fin de facilitar la creación del modelo y nuevos escenarios en EMME®, a continuación se exponen las indicaciones y herramientas creadas para la automatización de los procesos necesarios para ello. Éstos responden a la secuencia que se muestra en la siguiente figura.

Figura 15-1: Secuencia de procesos para creación del modelo y asignación de escenarios



Fuente: Elaboración Propia

Las dos primeras fases se abordan con un documento Excel de automatización de inputs. En él se aporta un conjunto de indicaciones generales para el uso del documento y, en cada hoja, se proveen indicaciones para la introducción de datos, la generación de cada archivo input (archivos de red, demanda y oferta) y la carga de cada uno de ellos en EMME®.

Una vez cargados los archivos con los datos de red, demanda y oferta, el proceso de asignación se realiza mediante la aplicación de macros creados en el entorno EMME®.

Por último, con el uso del documento Excel de lectura de las salidas de EMME®, es posible generar el resumen de los resultados de la asignación. Para ello en cada hoja del mismo documento se encuentran las indicaciones específicas para obtener los diversos resúmenes a partir de los archivos de salida de EMME®.

Para efectos del uso, se desarrolló un manual detallado sobre el uso de las herramientas de automatización de datos de entrada y de lectura de salidas para realizar un resumen de los resultados.

16 CAPACITACIÓN

Para dar cumplimiento al Plan de Capacitación ofertado Cityplanning, coordinó un curso formal de EMME® impartido directamente por su proveedor INRO, realizado desde el 22 al 25 de enero de 2018 de 9:00 a 17:00 horas en Salones de Capacitación, contratados para este efecto. El curso se impartió en idioma español con material en inglés. La distribución de contenido fue la siguiente:

- EMME basics (1 día)
- Network editor and calculators (1 día)
- Traffic assignment and analysis (1 día)
- Transit assignment and analysis (1 día)

El curso contó con una parte teórica y una práctica en cada Módulo impartido. INRO dispuso de llaves para hacer los ejercicios, entregó un libro con un compendio de las presentaciones y un tutorial de los ejercicios posible de ser instalado y replicado por el estudiante. Al final del curso, se procedió a entregar un Certificado de asistencia a cada participante.

Posteriormente, durante el mes de mayo de 2018, Cityplanning impartió un segunda curso complementario práctico donde se trataron aspectos directamente relacionados al uso del modelo de asignación calibrado, las aplicaciones desarrolladas para procesamiento y el análisis de resultados; además de casos de análisis con situaciones potencialmente reales. Los detalles de esta segunda ronda de sesiones se describen a continuación:

- Duración: 3 medias jornadas
- Lugar: Oficinas Cityplanning
- Temario por día:
 - Día 1
 - Presentación Modelo de Asignación DTPM
 - Día 2
 - Asignación modelo de demanda DTPM
 - Análisis de resultados
 - Día 3
 - Modificación de itinerarios
 - Modificación de red de modelación
 - Modificación de variables operacionales
 - Revisión de escenarios ficticios
 - Consultas específicas

17 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo del presente servicio fue realizar un mejoramiento y actualización del Modelo de asignación de viajes de transporte público desarrollado en plataforma EMME®, para así, apoyar a la autoridad en la toma de decisiones estratégicas asociadas a la definición y ajuste de los planes operacionales que se deben evaluar y sancionar en la DTPM.

Consistente con lo anterior, se propuso y desarrolló un conjunto de tareas que permitieran cumplir con el objetivo planteado por DTPM. En concreto, se desarrolló una zonificación del área de estudio, se seleccionó una hora de modelación para cada periodo y se estimaron matrices a partir de datos pasivos e información complementaria, todo ello de manera funcional al objetivo de modelar la hora más cargada del sistema en Punta Mañana, lo cual fue ampliado al periodo Fuera de Punta Mañana según lo propuesto por CityPlanning en su Oferta Técnica.

Con lo anterior, se construyeron y calibraron los modelos de asignación de viajes del sistema de transporte público de buses, Metro y Metrotren para la ciudad de Santiago, para los periodos Punta Mañana y Fuera de Punta Mañana, a Mayo 2017.

Posteriormente, los modelos desarrollados fueron actualizados a Julio de 2018 y se evaluaron un conjunto de escenarios de modelación, entre ellos la incorporación de las nuevas líneas de Metro proyectadas, cambios de la malla de recorridos de buses y sensibilidades de tarifa.

De manera complementaria, se generaron procesos de automatización para trabajar de mejor manera con los escenarios futuros que DTPM desee evaluar, y se realizaron capacitaciones tendientes a ampliar el conocimiento de la herramienta en la contraparte.

Este tipo de modelo de asignación de demanda de transporte público, permite identificar y cuantificar cambios en la distribución de demanda a nivel de servicio, parada y/o zona, producto de alteraciones en las condiciones de la oferta del sistema y así evaluar su impacto, en los usuarios y operadores. Mediante la modelación es posible determinar los niveles de demanda, tiempos de viaje e indicadores de comportamiento del sistema como son los transbordos entre líneas, número de etapas por viaje, etapas asignadas a cada modo, viajes que no utilizan servicios de buses y/o metro, entre otros. Todo lo anterior se realiza, con procedimientos sencillos y de fácil acceso, que fueron automatizados para su rápida ejecución.

Si bien los modelos construidos permiten la consulta de resultados con un alto nivel de detalle, se recomienda privilegiar el análisis de las variaciones porcentuales de los cambios registrados en una evaluación respecto a un escenario base, por sobre las variaciones a nivel de valores absolutos. Lo anterior, considerando que la demanda no es fija a lo largo de un año, aun cuando su estructura lo sea, y debido a que el enfoque estático de los modelos de asignación no asegura recoger adecuadamente las cargas en todos los servicios, para aquellos periodos donde existe remanente de demanda de un periodo anterior.

La caracterización de la red de modelación en ambos periodos de análisis, permite una asociación directa con los ejes y paradas que conforman el sistema de transporte público actual de la ciudad, además de permitir la extensión y/o modificación de la cobertura del sistema, ya que cuenta también con la vialidad principal de la ciudad. Producto de lo anterior, estos modelos permiten realizar de manera rápida y simple modificaciones en alguna de las características operacionales del sistema, como cambio de itinerarios, oferta, velocidades, tarifa, para evaluar su impacto en el sistema, tanto para los usuarios como para los operadores.

En consecuencia, el uso de esta herramienta en el proceso de decisiones de la autoridad es fundamental para orientar adecuadamente los recursos tanto en el proceso de mejoramiento de la malla de servicios desarrollado en los Programas de Operación, como en procesos de más largo aliento como lo son, las modificaciones necesarias producto de la entrada en operación de nuevas líneas de Metro. El nivel de detalle con el que fueron construidos los modelos permite que sean capaces de responder frente a pequeños cambios operacionales (alta sensibilidad), dimensionando su impacto a nivel táctico, así como también ante cambios importantes de la oferta, como lo es la incorporación de nuevos servicios al sistema.

Si bien el objetivo principal de este estudio fue actualizar el modelo de asignación de viajes del sistema Transantiago, para ello se debieron desarrollar valiosas e innovadoras metodologías. Se destacan entre ellas:

- Se desarrolló una metodología de zonificación, que permite segmentar el área de estudio considerando el comportamiento de los usuarios del sistema y la información de uso de suelo. Se obtuvo una zonificación que es un subconjunto de la zonificación previamente utilizada por DTPM, elaborando un polígono adhoc para agregación de información espacial. La zonificación resultante cuenta con 2.493 zonas. Además, se desarrolló un proceso que permitió asignar la demanda a nivel de paraderos a las zonas de manera distribuida.
- Se estableció una metodología para la incorporación de la evasión en la tabla de viajes obtenida por ADATRAP, lo que permitirá la actualización de la matriz de viajes con evasión, cuando se registren cambios significativos en la tabla de viajes, o bien, cuando se cuente con información actualizada de evasión.
- Se estableció una forma de construir la demanda que considera la hora más cargada para la punta mañana por zona, que pretende aproximarse al problema de la diferente temporalidad de las puntas en diferentes zonas de la ciudad, entendiendo que este problema en realidad es intrínseco a un sistema de esta dimensión en un enfoque estático de modelación.

Respecto al modelo de asignación de demanda utilizado en ambos periodos, destaca el hecho de que corresponde a una asignación con restricción de capacidad, esto quiere decir, que la selección de estrategias de viaje de los usuarios, no solo considera los tiempos de viaje, sino que también la aglomeración de todas las líneas disponibles que permiten completar el viaje y el aumento del tiempo de espera en parada, producto de la

capacidad disponible en los servicios. Esto, en un sistema de transporte público con altos niveles de congestión como el de Santiago, es fundamental para la correcta representación de la afluencia a nivel de línea, unidad de negocio y modo de transporte, como ha sido mostrado en los resultados obtenidos y validado con datos observados.

Por su parte, el proceso de calibración resultó exitoso, con altos niveles de ajuste, no sólo en los flujos de pasajeros de buses utilizados en el proceso de asignación, sino también en la afluencia de pasajeros por estación de Metro, utilizados para la validación del proceso. Lo anterior fue posible por la experiencia de CityPlanning en otros procesos de calibración realizados en modelo de demanda de distintas ciudades, y el contacto permanente entre los desarrolladores del software EMME®, quienes durante el desarrollo del estudio dispusieron, previo a la incorporación oficial en el software, la herramienta de ajuste de matriz que utiliza asignación con restricción de capacidad en las iteraciones. **Lo anterior, permitió mejorar significativamente los niveles de ajuste obtenidos respecto a la versión que no consideraba restricción de capacidad.**

Una consideración importante del modelo, es que si bien la demanda que evade está incluida en la matriz de demanda a priori y, por lo tanto, en la matriz ajustada para ambos periodos modelados, el modelo no reproduce cabalmente el comportamiento de los usuarios que evaden en el sistema ya sea en una o todas las etapas del viaje. Esta aseveración se basa en dos elementos:

- Es necesario re-evaluar la metodología de estimación de evasión ampliando su alcance y diseñando una corrección de este proceso que combine la corrección de las etapas de acceso y egreso al modo Metro, producto de las distorsiones observadas en el egreso de algunas estaciones, toda vez que la corrección sólo se desarrolló para el acceso.
- En la calibración de parámetros se utilizó una única estructura tarifaria, considerando la tarifa real del sistema, con un único tipo de usuario y por lo tanto, un único valor del tiempo y de penalidades. Así, en los modelos calibrados, se considera que los usuarios que pagan y los evasores enfrentan las mismas tarifas y emplean el mismo comportamiento al definir su estrategia de viaje, **lo que presenta un importante espacio de mejora a los modelos desarrollados, orientando los futuros posibles desarrollos a aplicar un enfoque multiusuario para la modelación, que permita también modelar adecuadamente a los usuarios escolares.**

Se debe tener presente que los resultados de los modelos de asignación pueden ser proyectados o bien, es posible evaluar cambios proyectados, siempre que dichas proyecciones no estén asociados a cambios en la estructura o dimensión de la demanda del sistema, por lo que dependiendo de la naturaleza de la iniciativa analizada puede que el modelo no responda adecuadamente, por ejemplo cuando un proyecto induce demanda (a matriz) desde modos que no están incorporados en el sistema.

Considerando los resultados y conocimientos obtenidos en el presente estudio, tanto de la caracterización de la demanda del sistema de transporte público (buses, metro y metrotren) de Santiago, como de su comportamiento, es que CityPlanning propone líneas futuras de

mejora para complementar la caracterización que entregan los modelos de Punta Mañana y Fuera de Punta del sistema de transporte público de Santiago. Entre ellas destacan:

- Construcción y calibración de un Modelo de Demanda del periodo Punta Tarde, que apoye y complemente la evaluación de iniciativas de mejora del sistema.
- Caracterización de distintos tipos de usuarios del sistema (usuarios pagos, evasores, estudiantes) tanto en la modelación como en la estimación de la demanda.
- Incorporación de funciones flujo-demora para caracterizar las velocidades del transporte público en función del flujo vehicular y de esta manera obtener cambios en la demanda producto del deterioro de los niveles generales de servicios del sistema.
- Incorporar modos complementarios al sistema de transporte público de la ciudad (colectivos, taxi, auto, bicicleta, buses rurales), ampliando con ello, su capacidad de predicción, integración de modos y zonas aledañas potenciales a ser integradas al sistema.

La adopción de las recomendaciones anteriores permitirá, en el futuro y con la experiencia de uso de los Modelos, evolucionar desde este enfoque estático a un enfoque dinámico de modelación, cuestión que resolvería de mejor manera la modelación de la diferente temporalidad de los periodos puntas en diferentes zonas de la ciudad, así como también permitiría una mejor aproximación a la estimación de perfiles de carga por servicio en aquellos periodos donde existe remante de demanda de periodos anteriores.