



ALCALDÍA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
SECRETARÍA DE MOVILIDAD

**DISEÑO CONCEPTUAL DE LA RED DE TRANSPORTE MASIVO  
METRO Y DISEÑO OPERACIONAL, DIMENSIONAMIENTO  
LEGAL Y FINANCIERO DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO EN  
EL MARCO DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE  
PUBLICO-SITP- PARA LA CIUDAD DE BOGOTA**

**PRODUCTO N° 03  
MATRICES DE VIAJE**

**MB-GC-ME-0003**

**Rev 3. Septiembre de 2009**



TITULO DEL DOCUMENTO: MATRICES DE VIAJE

DOCUMENTO N°: MB-GC-ME-0003

Referencia: P210C25  
Fichero: MB-P03-MATRICES DE VIAJE-20090914-ME

Revisión: Rev 3 Fecha revisión : Septiembre de 2009

	Nombre	Firma	Fecha
Realizado por	Adolfo Majano		Septiembre de 2009
	Daniel de La Hoz Sánchez		Septiembre de 2009
	Fernando de Lucas		Septiembre de 2009
	Johanna M <sup>a</sup> . Lobo Gutiérrez		Septiembre de 2009
	M <sup>a</sup> . Antonieta Royuela Escalona		Septiembre de 2009
	Xavier Albors Ripoll		Septiembre de 2009
Verificado por	José Manuel Almoguera		Septiembre de 2009
Aprobado por	Luis M. San Martín Esteban Rodríguez		Septiembre de 2009

**REGISTRO DE CAMBIOS**

<b>REV.</b>	<b>FECHA</b>	<b>SECCIÓN / PÁRRAFO AFECTADO</b>	<b>INICIO DEL DOCUMENTO/ RAZONES DEL CAMBIO</b>
0	Mayo 2009	TODOS	DOCUMENTO INICIAL
1	Junio 2009		ENTREGA PRELIMINAR
2	Agosto 2009		AJUSTE DOCUMENTOS
3	Septiembre 2009		INCORPORACIÓN DE OBSERVACIONES

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE MATRICES FUTURAS .....</b>	<b>7</b>
2.1	Esquema metodológico.....	7
2.2	Marco general metodológico .....	9
<b>3</b>	<b>SUBMODELOS DE GENERACIÓN – DISTRIBUCIÓN .....</b>	<b>15</b>
3.1	Consideraciones metodológicas previas del Submodelo de generación-atracción 15	
3.2	Consideraciones metodológicas previas del Submodelo de distribución zonal	18
3.3	Calibración de los submodelos de generación-atracción y distribución zonal	22
<b>4</b>	<b>SUBMODELO DE ELECCIÓN MODAL.....</b>	<b>29</b>
4.1	Consideraciones metodológicas previas del Submodelo de reparto modal ...	29
4.2	Trabajo de campo .....	29
4.2.1	Diseño de la encuesta.....	32
4.2.2	Definición de atributos y niveles .....	33
4.2.3	Análisis de la información obtenida en terreno .....	42
4.3	Estimación de modelos de elección modal.....	48
4.3.1	Estimación de modelos con datos de Preferencias Reveladas.....	49
4.3.2	Estimación de modelos con datos de Preferencias Declaradas .....	51
4.3.3	Utilización de los modelos en modalidad predictiva.....	64
<b>5</b>	<b>MODELO DE PIVOTE DE LAS MATRICES BASE 2008 .....</b>	<b>66</b>
5.1	Evaluación de la Congestión .....	69
<b>6</b>	<b>MATRICES DE VIAJES: ANÁLISIS Y COMPARATIVA.....</b>	<b>72</b>
6.1	Demanda total de viajeros.....	72
6.2	Evolución de los viajes según su distribución geográfica .....	73
6.3	Desequilibrio de la movilidad.....	75

6.4	Distancia media de los flujos .....	76
6.5	Estructura de los viajes .....	77
6.6	Patrón de movilidad por zonas de transporte .....	79
6.6.1	Generación y atracción por zonas .....	79
6.6.2	Crecimiento entre escenarios.....	81
6.7	Emmebank.....	85
<b>7</b>	<b>GLOSARIO.....</b>	<b>86</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

La movilidad actual en Bogotá está reflejada en los modelos de transporte existentes mediante las matrices de viaje en transporte público y privado contenidas en el estudio del SITP – marco de la consultoría realizada. Dichas matrices se han actualizado al año base 2008, tal y como se ha descrito previamente en el producto 02 del presente estudio.

Estas matrices se proyectan a futuro teniendo en cuenta los cambios en las variables socioeconómicas y territoriales consideradas en el modelo tomando como base las previsiones del POT y el PMM, de acuerdo con lo indicado en el producto 04; así como los cambios modales que pudiesen ocurrir ante las variaciones en la oferta de transporte derivadas, entre otras, de la introducción de nuevos modos de transporte como el metro y el tren de cercanías.

Para la obtención de estas matrices de futuro se precisa de la modelización previa de la generación – atracción – distribución y reparto modal de los viajes en el sistema al año base y éste es precisamente el objetivo principal de este producto 3, cuyo esquema metodológico resumido se comenta en el punto siguiente, y se desarrolla en detalle a lo largo del documento.

Hay que destacar finalmente que para la determinación del modelo de reparto modal, como complemento al trabajo de gabinete, se ha realizado un trabajo de campo específico no realizado en estudios anteriores y que sirve de complemento a los mismos.

La metodología desarrollada en el presente documento se ha centrado en la Hora Pico que es la utilizada para la identificación y selección de corredores de alta demanda y permite explicar un alto porcentaje de la movilidad.

## 2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE MATRICES FUTURAS

### 2.1 Esquema metodológico

La Figura 2 1 ilustra de manera simplificada el esquema metodológico del modelo de demanda que se ha utilizado para proyectar a futuro la movilidad que sirve de base para la elección de la primera línea de metro.

Tal como allí se indica, para llevar a cabo esta tarea se ha realizado un trabajo de campo, que incluye la realización de encuestas de Preferencias Declaradas (PD) y Preferencias Reveladas (PR), determinantes para la formulación de modelos capaces de reproducir y prever el comportamiento de la demanda actual y futura y por ende estimar la demanda de la primera línea de metro en el marco de un sistema integrado de transporte público (SITP).

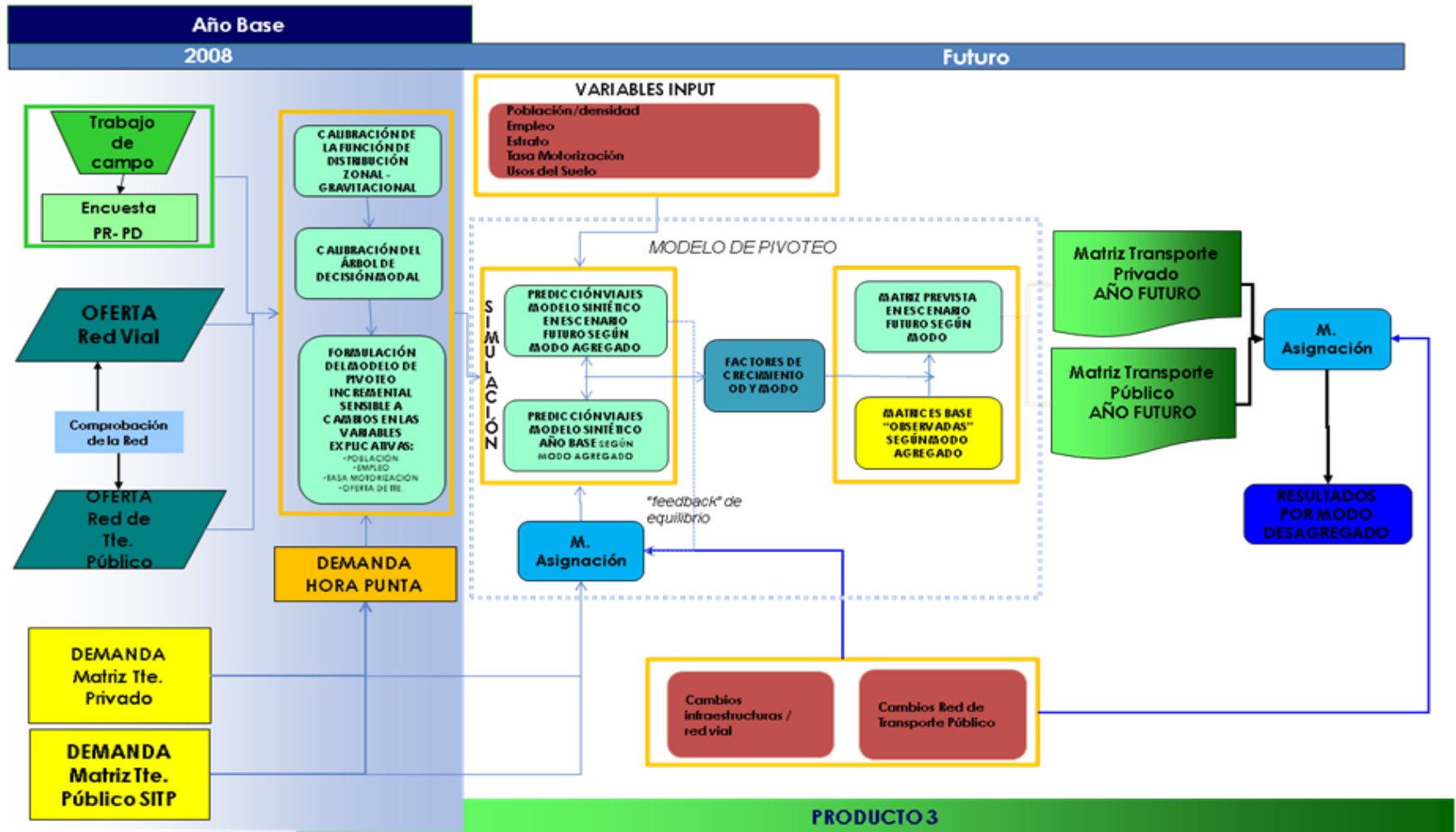
Dado que se proyecta un nuevo servicio tipo metro, los cambios en las características socioeconómicas de los habitantes de la ciudad, el crecimiento de la tasa de motorización y el establecimiento de políticas restrictivas (pico y placa, estacionamiento), generan cambios en la demanda. El modelo que se empleará debe ser lo suficientemente flexible para ser sensible a estar circunstancias.

A partir de la información socioeconómica actualizada y de la descripción de la oferta de transporte para el año base se calibran modelos sintéticos de generación de viajes, de distribución zonal y de elección modal considerando dos tipos de usuarios: los que tienen acceso al transporte privado y los que no. Los segundos se toman como “cautivos” del sistema de transporte público, y constituyen la amplia mayoría de la demanda. Este subconjunto de población ha sido ampliamente estudiado en anteriores trabajos configurando el actual modelo de asignación multimodal del SITP. Sin embargo no se dispone de la misma información sobre las decisiones modales de aquellos que teniendo disponibilidad de vehículo privado. En este contexto, el modelo de elección modal se complementa con un modelo de elección modal precisamente de este subgrupo de población...

La proyección a futuro de las matrices de viaje en transporte público y privado ajustadas para el año base se hace mediante un modelo de pivote que refleje los cambios de movilidad que van a producirse a futuro medidos éstos a partir de factores de crecimiento obtenidos de modelos sintéticos.

Estimadas las matrices modales, se procede a la asignación. En la aproximación propuesta para los escenarios futuros, la red de transporte público es modelada como una red integrada, en la cual los usuarios tomarán la alternativa en función de los costos generalizados. En este sentido, y en todos los escenarios planteados, se tendrá un sistema de transporte público plenamente integrado, con unos esquemas empresarial, tarifario y operacional diferentes a los del servicio de transporte público existente.

Figura 2-1 Esquema general de modelización



Fuente: Elaboración propia



## 2.2 Marco general metodológico

Muchas ciudades, regiones o países han desarrollado modelos de predicción de la demanda que apoyan la toma de decisiones sobre las políticas y estrategias de transporte. Estos modelos pasan por la constatación de que desarrollos exógenos o las propias políticas de transporte afectan o impactan sobre el comportamiento de las personas o las actividades de un área o territorio.

Una aproximación frecuente en modelización, la cual puede sustancialmente mejorar la precisión del modelo puesto que reduce o amortigua los errores cometidos en el proceso de modelización sistémico, es la formulación del modelo como la predicción de cambios sobre la situación del año base. Dado que la observación de la situación actual puede ser bastante precisa, principalmente en lo que se refiere a la demanda de transporte público en hora punta (tal y como se constata en el producto 2), la aproximación metodológica para elaborar un modelo que permita predecir diferencias o cambios respecto a esta situación se anticipa como la mejor opción. Esta aproximación permite reducir el alcance de los errores en la modelización (ya sean éstos debidos a errores en el propio modelo o en los “inputs” o información de la que se nutre) que influyen en los resultados finales puesto que no se trata tanto de obtener del modelo datos absolutos sino datos relativos (de cambio) que puedan aplicarse a la situación original de partida.

Estas aproximaciones denominadas generalmente como métodos de pivoteo (“pivot- point”) (Manheim, 1979<sup>1</sup>) también son denominados por algunos autores como métodos incrementales (Ortuzar & Willumsen, 2001<sup>2</sup>).

Mientras que la filosofía de reducción de errores es clara, la implementación de este principio en sistemas o modelos prácticos ha diferido de unas experiencias a otras realizándose de diferentes formas y maneras. En todo caso parece claro que se han de considerar de forma especial:

- Si el cambio predicho puede ser expresado como una diferencia absoluta, proporcional a un ratio o como una aproximación mixta.
- Atender con especial cuidado a las nuevas áreas de desarrollo (“green-field”) futuro en las que las situaciones en futuro van a diferir de forma extrema con las situaciones actuales.

Estos modelos de pivoteo planteados en este estudio se formulan basados en modelos sintéticos pero no toman el valor predicho por el modelo sintético como un valor absoluto sino como un valor relativo sobre el cual poder medir cambios proporcionales sobre el propio modelo base y así poder aplicárselo a la situación actual observada.

La justificación para la aplicación de esta metodología de pivoteo reside principalmente en la calidad de la información sobre la movilidad en transporte público observada para el año base 2008 obtenida a partir de los trabajos realizados para su actualización en 2007 por Cal y Mayor.

Los modelos de pivoteo o incrementales pueden tener dos especificaciones diferentes:

- Aquellos que claramente usan el modelo sintético aplicable a la situación base y a los escenarios futuros, de tal forma que se pueden obtener resultados del modelo para ser usados en forma de ratio o de diferencia absoluta para estimar o ajustar la matriz base o de pivote.

---

<sup>1</sup> Manheim, M.L. (1979). *Fundamentals of Transportation System Analysis*. The MIT Press, Cambridge. Mass.

<sup>2</sup> Ortúzar, J.de D., Willumsen, L.G. (2001). *Modelling Transport*, Third Edition. John Wiley & Sons Ltd,Chicester. UK.

- Aquellos que únicamente predicen cambios relativos con respecto a la base los cuales son más identificados como modelos incrementales.

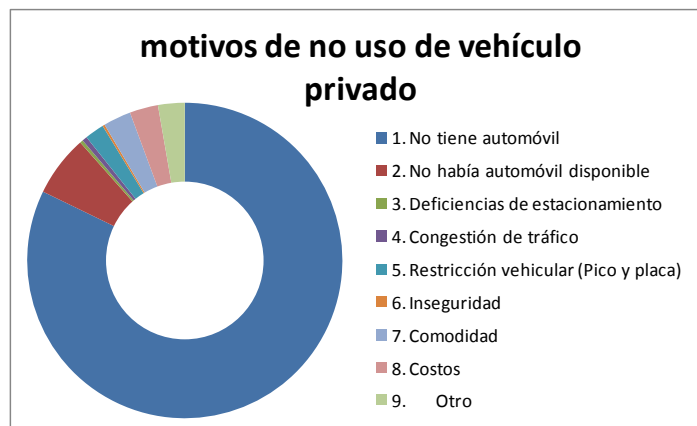
En este estudio, y dados los cambios tanto en la estructura general de la ciudad a futuro, por ejemplo poblacional, como de la propia oferta de transporte, el modelo incremental se anticipa como menos adecuado que el modelo de pivote por factor o por diferencia (o mixto).

En todo caso, la metodología de proyección de la demanda a futuro debe ser capaz de responder a los principales cambios que puedan producirse en la ciudad tanto por la redistribución de actividades (residencial, comercial, industrial, etc....) como a cambios en la oferta de transportes (nuevas infraestructuras de transporte, estrategias de gestión de la demanda,...). Y por tanto el modelo sintético deberá tener una estructura coherente con este propósito. Ello permite estimar o simular las demandas bajo diferentes situaciones y contextos la interacción entre oferta y demanda de movilidad en la ciudad y la región.

En la formulación y estructuración de este modelo de pivoteo hay que tener una serie de circunstancias que condiciona la metodología final elegida y que se van exponiendo a lo largo de este documento. Una cuestión importante que tiene especial relevancia no sólo actualmente sino principalmente en su impacto en las condiciones de futuro es la evolución de la tasa de motorización de la población de la zona de estudio. La disponibilidad de vehículo o tasa de motorización es una variable relevante. Todos los estudios anteriores identifican la "cautividad" del Transporte público de los estratos inferiores precisamente por la no disponibilidad de vehículos privados. En el Plan Maestro de Movilidad se resume esta circunstancia: "El motivo por el cual los viajes en transporte privado se presentan en baja proporción en los estratos bajo y medio se debe simplemente a que los usuarios de estos segmentos socioeconómicos no cuentan con la posibilidad de hacer uso de este modo de transporte y por lo tanto se movilizan principalmente a través del transporte público. El 89.96% de los viajes que se realizan en transporte público son efectuados por personas que no cuentan con la opción de realizar elección modal".

Esto también tiene su reflejo en la propia encuesta de Movilidad (figura 2-2) en la que el porcentaje de individuos que no utilizan el vehículo privado tienen que ver precisamente con motivos derivados de su disponibilidad o estrategias de gestión de la demanda como pueden ser "pico y placa" o de estacionamiento. Dada esta circunstancia, el modelo debe tener presente la diferenciación de posibilidad de elección entre aquellos que pueden tener la posibilidad de ir en vehículo privado y los que no.

**Figura 2-2 Motivos reflejados en la encuesta por los que no se utiliza el vehículo privado**



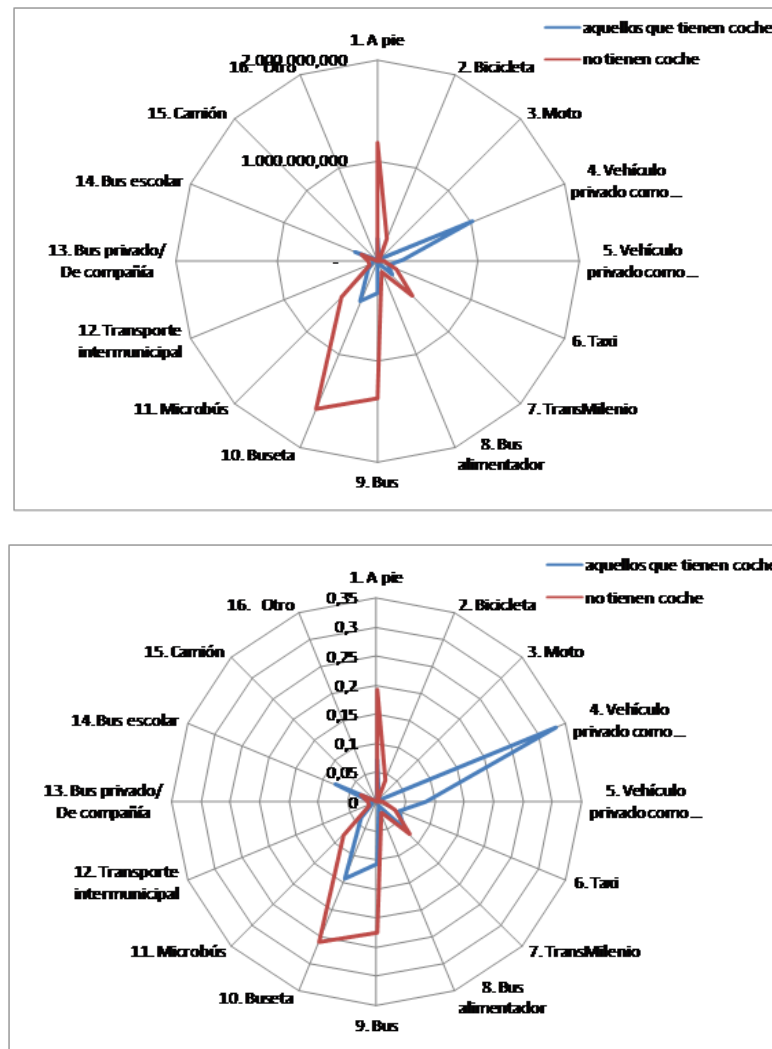
Fuente: Encuesta Domiciliaria de Movilidad 2005.

Fruto de esta segmentación poblacional entre aquellos con disponibilidad de vehículo de los que no la tienen, se pueden contemplar diferentes patrones de elección modal tal y como se refleja en la figura 2-3.

Mientras que los individuos con disponibilidad de vehículo basan su movilidad especialmente en los modos privados, los que no tienen disponibilidad lo hacen principalmente en modos colectivos o no mecanizados (a pie).

Este patrón de comportamiento debe ser contemplado en el modelo puesto que las decisiones modales son claramente diferentes entre ambos segmentos poblacionales. Por otro lado las estrategias de “pico y placa” tendrán su impacto precisamente sobre un determinado segmento de población con unas preferencias de elección modal diferentes

Figura 2-3 Distribución modal de los segmentos de población con y sin disponibilidad de vehículo privado



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Encuesta Domiciliaria de Movilidad 2005.

Por tanto, en lo referente a la elección modal, parece claro que se ha de tener en consideración los dos grupos de población (aquellos con disponibilidad de coche y aquellos en los que no) a la hora de la formulación final del modelo.

El planteamiento general metodológico que se describe a continuación tiene en cuenta esta circunstancia y otras siguiendo una estructura clásica de modelo de 4 etapas iterativo en el que existen diferentes

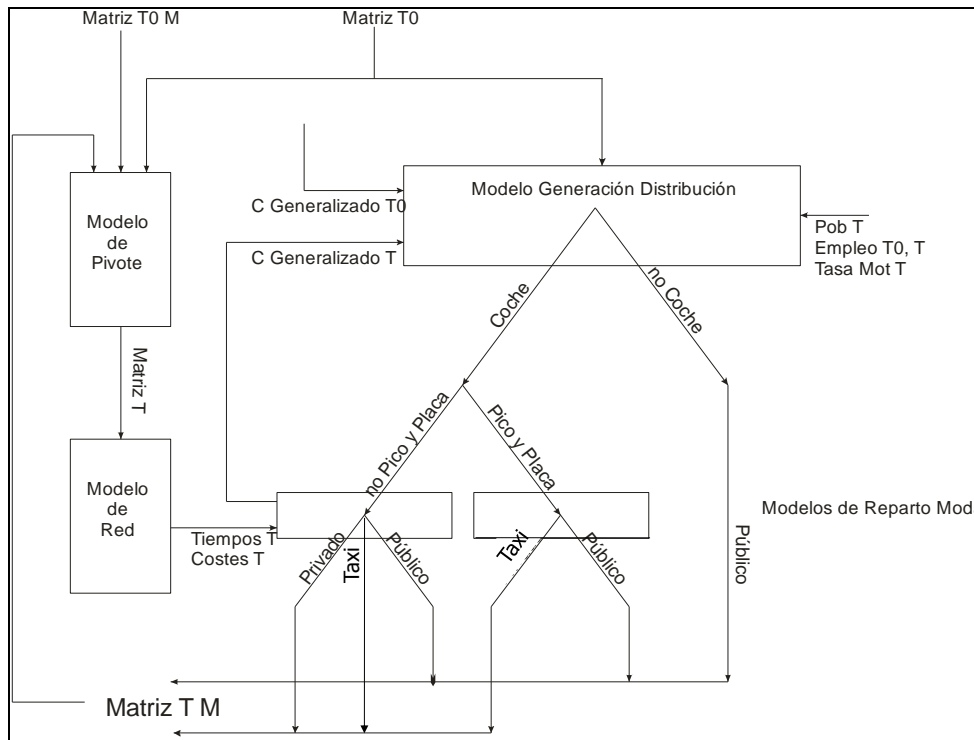
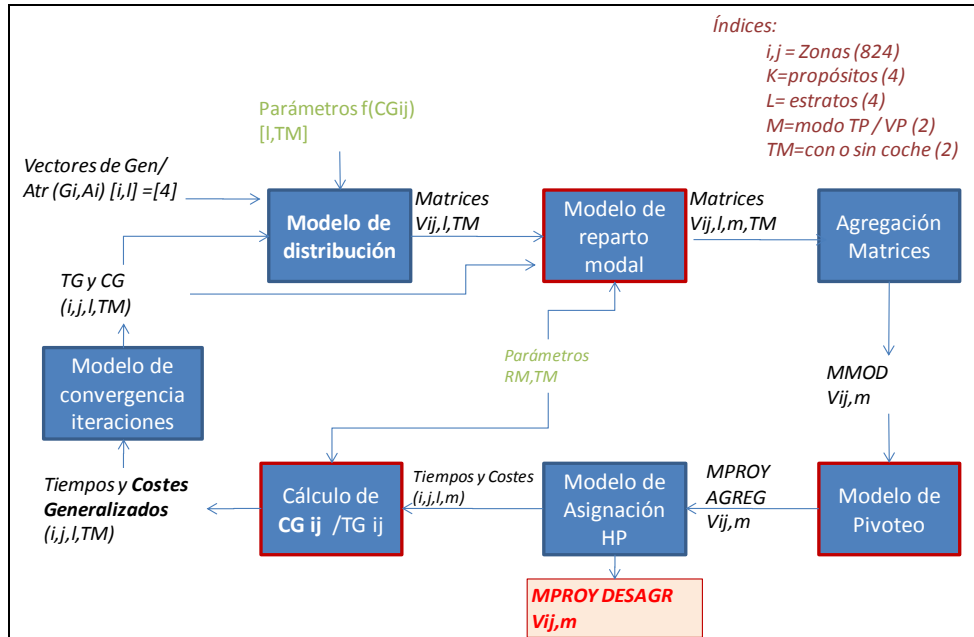
submodelos que representan la generación o atracción de los viajes por cada zona de estudio, la distribución de estos viajes entre las zonas, la elección modal que se produce para satisfacer la demanda planteada en la fase anterior así como su asignación en red de dicha elección.

Atendiendo a estas particularidades, la aproximación de pivoteo de las matrices base se realizaría bajo la estructura descrita a continuación y reflejada en el esquema metodológico presentado en el punto 2.1:

1. Las matrices de vehículo privado y transporte público de hora punta son las matrices de referencia del año base (2008)
2. Se calibra un modelo sintético de 4 etapas (Generación / atracción, distribución zonal, distribución modal, asignación) con las especificaciones o particularidades que se detallan en los apartados siguientes. Las principales características de estos modelos planteados son:
  - a. Trabajar con dos segmentos de población diferenciada: aquellos con disponibilidad de vehículo privado como opción de elección modal y los que no disponen de vehículo.
  - b. Trabajar con características socioeconómicas resumidas en el estrato social al que pertenece el individuo
  - c. Trabajar con dos niveles de reparto modal. El primero se aplica a los individuos con disponibilidad de coche. Este es un nivel agregado en el que el Transporte Público es una opción integrada para el usuario, frente a la opción de coche o taxi. El segundo nivel se produce en la fase de asignación para viajes de transporte público exclusivamente en la que el individuo en función de su percepción del tiempo – modo elige la combinación de modos de transporte público más adecuada para sus predilecciones
3. Los outputs del modelo sintético descrito anteriormente referidos a las 3 primeras etapas son por tanto matrices Origen Destino (matrices OD) según estrato (o grupos de estratos) y según modo agregado (auto, transporte público). Con ellas se pueden calcular los factores de crecimiento aplicables a las matrices del año base. La asignación de las matrices agregadas futuras permite obtener la movilidad desagregada por modo. Así mismo los outputs del modelo de asignación en cuanto a tiempos y costes son utilizados como inputs del modelo de distribución y elección modal dentro del coste generalizado, en un caso compuesto y en otro como costes generalizados modales.

En la Figura 2-4 se detallan los esquemas metodológicos que estructuran el procedimiento descrito de estimación de las matrices de demanda a futuro.

Figura 2-4 Esquema de detalle de la metodología de estimación de viajes futuros

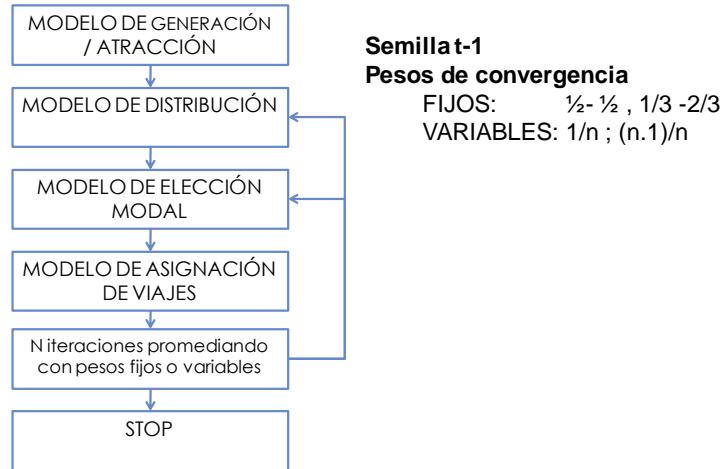


Fuente: Elaboración propia

- El procedimiento de cálculo de los viajes por par OD y modo agregado se obtiene bajo unas condiciones de equilibrio que resultan importantes en el momento en el que la congestión es un elemento importante de la hora pico y existen modos cuyo servicio se realiza por vías o infraestructuras exclusivas. Es por ello que se aplica un procedimiento iterativo de convergencia

(también denominado procedimientos de retroalimentación o “feedback”) entre las etapas de asignación y las de distribución zonal y modal puesto que existe una interdependencia entre todas ellas. Los outputs del proceso de asignación en forma de atributos del coste generalizado (tiempos, costes, transbordos,...) en la iteración  $n$  son ajustados mediante procedimientos fijos o variables para servir de nuevos inputs en las etapas de distribución zonal y modal de la iteración siguiente tal y como se muestra en la Figura 2-5.

**Figura 2-5 Mecanismo de convergencia para la situación de equilibrio**



Fuente: Elaboración propia

El mecanismo anterior trata de ponderar valores para la siguiente iteración tomando en cuenta qué valor ha tenido la anterior iteración de tal forma que esta ponderación puede ser fija en forma de promedio ( $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{2}$ ) o en forma de que la iteración t-1 pese  $\frac{1}{3}$  y la siguiente  $\frac{2}{3}$ . Esta ponderación también puede hacerse variable, Es decir que a medida que haya más iteraciones pesen más las últimas que las primeras. En este trabajo se ha decidido mantener una ponderación promedio entre iteraciones ( $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{2}$ ).

Partiendo del esquema metodológico presentado anteriormente, el modelo de proyección de viajes, tal y como se expresaba como condición, debe ser sensible a las principales variables explicativas de tal forma que:

- Cambios poblacionales derivados de una relocalización o crecimiento de la población zonal estratificada motivará cambios en la movilidad generada por esa zona
- Cambios en la capacidad atractora de las zonas provocarán cambios en la movilidad atraída por cada zona.
- Cambios en la oferta de transporte provocará transformaciones en las relaciones interzonales así como en las elecciones modales por cada par OD.

### 3 SUBMODELOS DE GENERACIÓN – DISTRIBUCIÓN

#### 3.1 Consideraciones metodológicas previas del Submodelo de generación-atracción

El principal output de este modelo ha de ser los nuevos vectores de generación-atracción de viajes mecanizados en los escenarios futuros.

El modelo de generación-atracción mantiene la zonificación que se ha venido ajustando y utilizando tanto en los anteriores estudios como en la estimación de la matriz de 2008 siendo ésta de 824 zonas.

Cada una de estas zonas presenta características específicas sobre las que se asocian variables socioeconómicas, territoriales, dotacionales, etc. Para la estimación de la demanda a futuro es necesario determinar las variables principales capaces de explicar la generación de desplazamientos actuales así como los futuros de tal forma que su cambio produzca modificaciones en el número de viajes que genera cada zona.

Por tanto, estas variables han de ser en primer lugar representativas o explicativas de la generación pero al mismo tiempo deben de tener robustez en su proyección a futuro.

La producción de desplazamientos de cada zona responde a variables tales como:

- Número de hogares en la zona
- Ingresos medios de los hogares
- Densidad de los hogares
- Número de miembros o tamaño del hogar
- Edades de los miembros del hogar
- Estrato socioeconómico
- Disponibilidad de vehículos particulares
- Etc....

En un contexto agregado o traducido a zona, la generación de viajes de cada zona quedaría explicada por:

- Población de la zona, global o estratificada
- Densidad media de la zona
- Ingreso medio de la zona
- Tasa de motorización media de cada zona

La estimación de viajes en los escenarios futuros estaría asociada a una función cuya variable dependiente sean los viajes generados y cuyas variables independientes o explicativas sean algunas de las identificadas anteriormente.

Desde el punto de vista matemático la formulación de este tipo de modelos tienen la siguiente expresión:

- Viajes generados / atraídos por zona i en una formulación por zona agregada:

$$Y_i = \alpha_1 + \alpha_2 X_{i1} + \alpha_3 X_{i2} + \dots + \alpha_n X_{in}$$

- Viajes generados / atraídos por zona i en una ajuste por hogar:

$$y = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 x_2 \rightarrow Y_i = N_i * \bar{y} = N_i (\alpha_1 + \alpha_2 \bar{x}_{1i} + \alpha_3 \bar{x}_{2i})$$

Cuya expresión particular para el caso de utilizar variables dummy que segmenten la muestra en diferentes estratos:

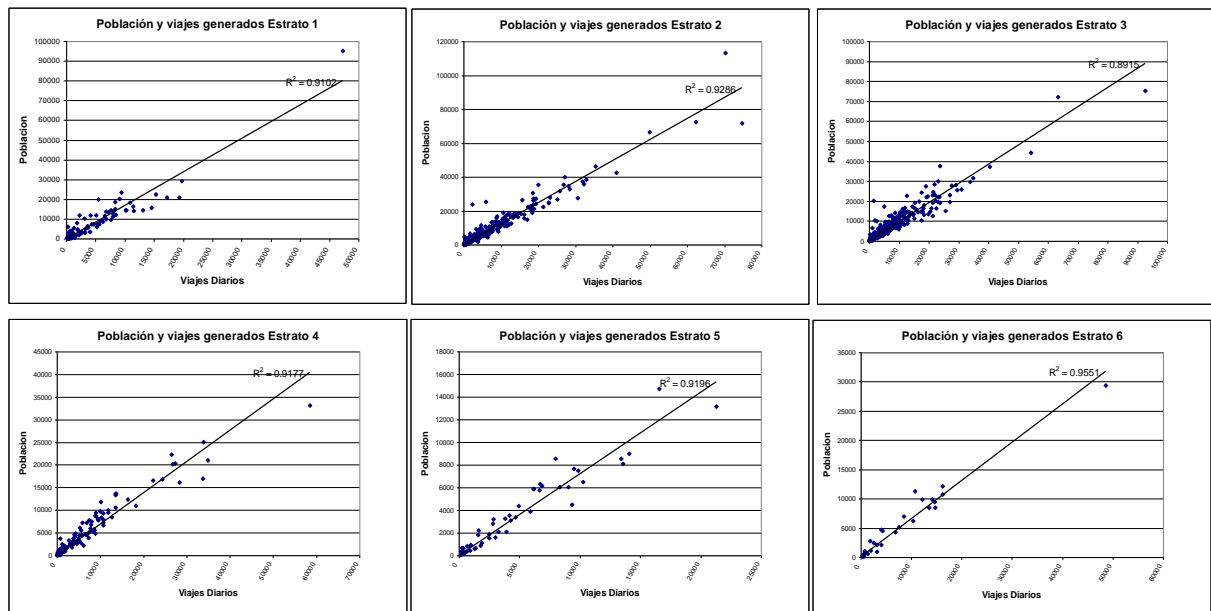
$$y = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 Z_1 + \alpha_4 Z_2 \rightarrow Y_i = N_i (\alpha_1 + \alpha_2 \bar{x}_{1i}) + \alpha_3 N_1 + \alpha_4 N_2$$

Donde Z sería una variable muda (0,1) y por tanto demandaría identificar cuantos de los hogares de la zona i (Ni) pertenecen a cada estrato o segmento (N1 y N2).

Otros modelos comúnmente utilizados para estimar los viajes generados son los que tienen que ver con análisis por categorías o factores de crecimiento.

En este contexto, analizando la Encuesta domiciliaria y los viajes de las zonas por estrato predominante frente a la población de cada una de ellas, se encuentran coeficientes de correlación muy significativos (recogidos en la Figura 3-1) que permiten afirmar que la variable población estratificada está fuertemente asociada a la generación de desplazamientos y es capaz de explicar en gran medida la generación de viajes de cada zona. Esta distribución estratificada de la población recoge en sí misma muchas de las características socioeconómicas y demográficas medias de los hogares y por tanto puede explicar, sin pérdida de generalidad, la capacidad generadora de viajes de una determinada zona. Por otro lado, esta variable es la más robusta de proyección a futuro.

**Figura 3-1 Población zonal estratificada y viajes zonales generados obtenidos en la Encuesta Domiciliaria de Movilidad de 2005**

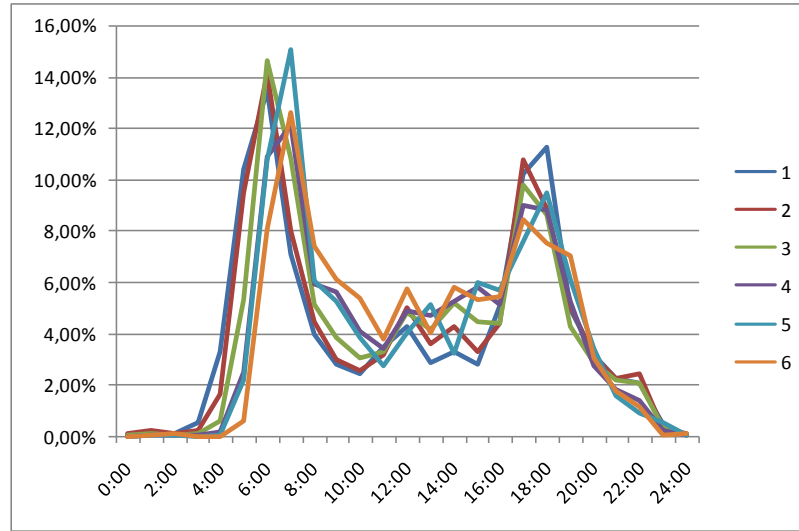


Fuente: Validación de las matrices resultantes de la encuesta de movilidad mediante la modelación de transporte (2007)

Si bien las tasas de generación de viajes incrementan por estrato, los patrones de desplazamiento horarios son similares, según se muestra en la figura 3-2 (todos los viajes) y en la figura 3-3 (sólo viajes con origen en el hogar).

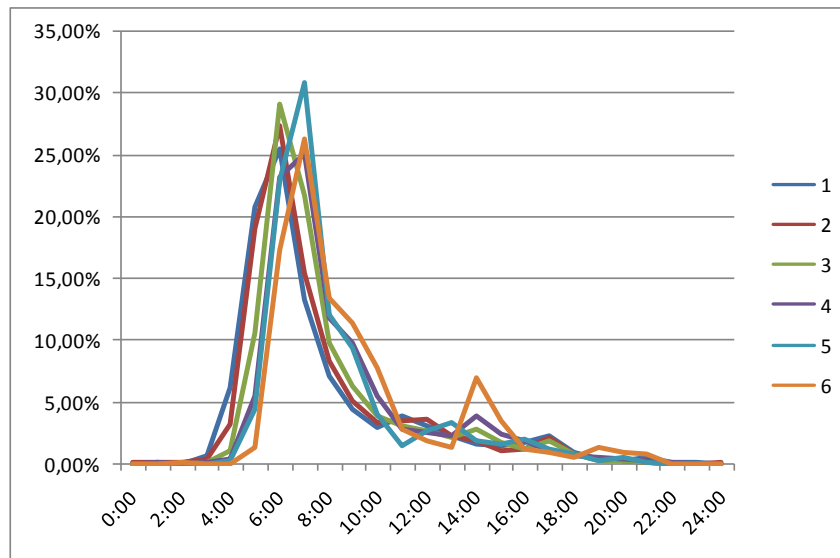


**Figura 3-2 Distribución horaria según estratos de los viajes -Encuesta Domiciliaria de 2005**



Fuente: Elaboración propia a partir de la Encuesta de Movilidad

**Figura 3-3 Distribución horaria según estratos de los viajes realizados desde el Hogar- Encuesta Domiciliaria de 2005**



Fuente: Elaboración propia a partir de la Encuesta de Movilidad

Teniendo en cuenta esta situación, se ha utilizado la población estratificada como variable explicativa estimándose las tasas de generación por estrato predominante de zona en base a las matrices de hora punta de 2008 estimadas en el producto 2.

Una situación similar ocurre con las variables independientes o explicativas vinculadas a la atracción. La variable más significativa es el empleo que se correlaciona con actividades económicas y comerciales. La relocalización de actividades económicas es menos dinámica que la de población y de manera dependiente de la organización territorial de usos del suelo.

En todo caso, tanto la variable población como la variable empleo son proyectadas en el Producto 4 con metodologías ad-hoc realizadas por el Grupo Consultor dado que no existen proyecciones para los escenarios temporales que se plantean en este estudio.

A la vista de lo anterior, el modelo de proyección de viajes será sensible a estas variables de tal forma que:

- Cambios poblacionales derivados de una relocalización o crecimiento de la población zonal estratificada motivará cambios en la movilidad generada por esa zona
- Cambios en la capacidad atractora de las zonas derivadas de cambios en los empleos de la zona provocarán cambios en la movilidad atraída por cada zona.

### 3.2 Consideraciones metodológicas previas del Submodelo de distribución zonal

El submodelo de distribución zonal va a proporcionar información sobre el cambio de la demanda origen destino derivado principalmente de cambios en la atractividad de las zonas o en la facilidad/dificultad para acudir a esa zona desde la zona origen en comparación con el resto de zonas. Con ello se debe ser capaz de proyectar los factores de cambio por par origen-destino que van a producirse en los escenarios futuros bajo diferentes condicionantes socioeconómicos y de oferta de transporte. A este respecto, mientras que los modelos de generación-atracción van a producir los vectores zonales de generación y atracción, se considera que un modelo gravitacional es la mejor aproximación para representar los cambios de interacción zonal que pueden derivarse por el hecho de modificar las condiciones de la oferta de transportes dado que la evaluación es muy a largo plazo. Esta consideración es relevante porque se asume que en tan largo plazo las dinámicas de “equilibrio inestable” que se producen entre la actividad residencial y la actividad laboral y un interrelación que son ni más ni menos los viajes de “commuting” o recurrentes han tenido tiempo suficiente (se sabe que su velocidad de cambio es lenta) como para reacomodarse en los diferentes escenarios temporales.

El modelo gravitacional, originalmente derivado por la analogía de la ley de la gravedad de Newton, estima el número de viajes de cada celda OD (modelo sintético) en base a un comportamiento o patrón observado en forma de la distribución o frecuencia de los viajes observados según una magnitud de impedancia del desplazamiento. Ese modelo trata de replicar ese patrón dadas unas características de generación y atracción de viajes.

La función más general del modelo gravitacional es

$$V_{ij}^n = A_i^n O_i^n B_j^n D_j^n f(\tilde{C}_{ij}^n)$$

Donde  $f(\tilde{C}_{ij}^n)$  es la función de impedancia relacionada con la desutilidad del desplazamiento entre cada par de zonas  $i,j$  con parámetros, y  $A_i$  y  $B_j$  son factores de balanceo que se permiten cumplir las condiciones de compatibilidad o coherencia con los vectores de generación y atracción. Se formulan como:

$$A_i^n = \frac{1}{\sum_j B_j^n D_j^n f(\tilde{C}_{ij}^n)}$$

$$B_j^n = \frac{1}{\sum_i A_i^n O_i^n f(\tilde{C}_{ij}^n)}$$

Si bien esta es la aproximación del modelo denominado doblemente acotado, para el caso del modelo de proyección de viajes, dado que lo se busca principalmente es utilizar el modelo gravitacional para estimar cambios de demanda, el planteamiento se restringido a un modelo simplemente acotado y más concretamente acotado a origen (es decir al vector de generación) siendo  $B_j$  por tanto igual a 1. El desarrollo o evolución de la hora punta no mantiene una pauta de inducción de viajes sino que más bien es más consistente con la evolución de la situación demográfica-económica en la que la población activa es una pieza clave.

La aproximación hacia un modelo de “crecimiento” en el que se miden cambios viene promovida por el hecho de contar de partida con la alta calidad de la información referente a la movilidad del año base en transporte público en hora punta, insumo principal que va a tener el metro. Para calcular esos factores de crecimiento en lo referente a la distribución OD de los viajes pasa por dos alternativas:

- 1) Utilizar un modelo incremental en el que las variables explicativas básicas tienen que ver con variables de cambio de de variación con relación a la situación de referencia.
- 2) Utilizar un modelo sintético para generar ratios de crecimiento a partir de los valores de viajes generados por el modelo en los escenarios futuros con respecto a los que da el propio modelo en el escenario base.

En cualquiera de los casos, la tasa de motorización es una variable que va a condicionar la situación de demanda futura y puede generar cambios en los patrones de movilidad-desplazamiento en función de la situación de oferta a la que se encuentre el individuo. Está más que demostrado en la literatura científica que planificaciones orientadas a aumentos de capacidad para el vehículo privado como principal referente han desembocado (si no hay un control del uso del suelo) en una dispersión de actividades, en un aumento del uso del coche y en un aumento de la distancia media de desplazamiento. En todo caso, el modelo incremental seguiría una formulación como la siguiente

$$T_{ij}^{k,hp} = (\gamma_k) \times G_i^k \times \frac{T_{ij,k}^o a_j e^{-\beta_k^\gamma \Delta CG_{ij}^\gamma}}{\sum_j T_{ij,k}^o a_j e^{-\beta_k^\gamma \Delta CG_{ij}^\gamma}} + (1 - \gamma_k) \times G_i^k \times \frac{T_{ij,k}^o a_j e^{-\beta_k^{1-\gamma} \Delta CG_{ij}^{1-\gamma}}}{\sum_j T_{ij,k}^o a_j e^{-\beta_k^{1-\gamma} \Delta CG_{ij}^{1-\gamma}}}$$

Este modelo es un modelo gravitacional incremental (Modelling Transport, 2001) adaptado para contemplar la movilidad diferenciada por estrato así como por disponibilidad de vehículos siendo:

- $k$  representa el estrato o conjunto de estratos socioeconómicos.
- $\gamma_k$  representa la proporción de la población en la zona  $i$  con disponibilidad de usar el vehículo privado para los estratos socioeconómicos  $k$ .
- $G_i$  representa los viajes generados en la zona  $i$  en el escenario  $t$ .
- $a_j$  representa los factores de crecimiento de la atractividad de las zonas de destino.
- $\Delta CG_{ij}$  representa la variación en el coste generalizado compuesto para cada par  $ij$ . Este coste es un coste que integra tanto al Vehículo Privado como al Transporte Público, por lo que será necesario la información del modelo de reparto modal (parámetros del modelo de elección modal) para su cálculo. El parámetro  $\beta$  es un parámetro a calibrar. Para el caso de la población  $(1 - \gamma_k)$  que no disponen de coche se toma como hipótesis que son cautivos del transporte público y por tanto ese coste estaría vinculado al tiempo o al coste generalizado del transporte público exclusivamente.
- $T_{ij,k}^o$  representan los viajes observados en el escenario de referencia.
- $\beta$  es el parámetro de la función de impedancia.

Pero dadas las características de este estudio, tal y como se ha explicado en apartados anteriores, se identifica como metodología más apropiada el utilizar el modelo sintético absoluto y obtener así factores de crecimiento (ya sea en forma de ratios o aditivos). Es por ello que la formulación del modelo sintético seguirá una formulación de modelo simplemente acotado a orígenes con la siguiente estructura:

$$T_{ij}^{k, hp} = (\gamma_k) \times G_i^k \times \frac{A_j \times \tilde{C}_{ij}^{\gamma \alpha_k^\gamma} \exp(\beta_k^\gamma \tilde{C}_{ij}^\gamma)}{\sum_j A_j \times \tilde{C}_{ij}^{\gamma \alpha_k^\gamma} \exp(\beta_k^\gamma \tilde{C}_{ij}^\gamma)} + (1 - \gamma_k) \times G_i^k \times \frac{A_j \times \tilde{C}_{ij}^{(1-\gamma) \alpha_k^{1-\gamma}} \exp(\beta_k^{1-\gamma} \tilde{C}_{ij}^{1-\gamma})}{\sum_j A_j \times \tilde{C}_{ij}^{(1-\gamma) \alpha_k^{1-\gamma}} \exp(\beta_k^{1-\gamma} \tilde{C}_{ij}^{1-\gamma})}$$

Donde:

- $k$  representa el estrato o conjunto de estratos socioeconómicos.
- $\gamma_k$  representa la proporción de la población en la zona  $i$  con disponibilidad de usar el vehículo privado para los estratos socioeconómicos  $k$ . Se calcularía básicamente a partir de la tasa de motorización y la tasa media de ocupación de los viajes.
- $\alpha, \beta$  son los parámetros de la función de impedancia. Los parámetros serán calibrados para cada estrato o subconjunto de estratos  $k$  así como para la función de costes generalizado de la población  $\gamma$  y  $(1-\gamma)$ .
- $\tilde{C}_{ij}$  = coste generalizado compuesto. Las impedancias o factores de fricción, son indicadores que tratan de medir la dificultad o reticencia percibida por un viajero al tratar de ir de un origen  $i$  a un destino  $j$ . Dado que la distribución zonal y modal considera dos grupos diferentes: los que tienen coche a su disponibilidad  $\gamma$  y los que no  $(1-\gamma)$ , la función de impedancia es diferente para cada grupo de población considerado. Los que pertenecen al primer grupo, al momento de realizar un viaje tienen la opción de decidir entre viajes en coche, taxi o transporte público; mientras que el segundo grupo es considera cautivo del transporte público. Eso hace que para los individuos con disponibilidad de coche y por tanto su elección modal engloba coche, taxi y transporte público, la función de impedancia se estimará como función del coste generalizado compuesto de estas alternativas. En cambio, en el caso del otro subconjunto, será el tiempo generalizado que se estima directamente del modelo de asignación.
- $G_i^k$  representa los viajes generados en la zona  $i$  en el escenario  $t$  y según estrato o conjunto de estratos  $k$ . Eso quiere decir que se formulará un modelo de generación zonal asociado a la población existente en cada zona (estratificada o no si es representativo) de tal forma que el número de viajes en escenarios futuros serán sensibles únicamente a cambios en la situación demográfica. La tasa de motorización pasaría a ser una variable de elección modal.
- $A_j$  representa la atractividad de las zonas de destino. Las zonas en donde se espera un crecimiento de las dinámicas urbanas según los diferentes sectores productivos (estudio, servicios, comercio o actividad industrial,...) deberían representar un aumento de los viajes atraídos. En este sentido y dada la situación de información recogida y disponible en los horizontes temporales, el factor principal de explicación de la atractividad zonal será el empleo por cada zona  $j$ .

Eso quiere decir que la producción de viajes  $G_i$  (función de la población estratificada), es distribuida entre las zonas disponibles  $j$  de acuerdo con la relación entre la atractividad relativa de cada zona  $j$  definida ésta como el producto de la atracción de viajes medidos en base a los empleos de la zona ( $A_j$ ) y la impedancia del par O-D  $ij$  en relación a todas las atractividades del resto de zonas potenciales. La atractividad de cada zona depende de las actividades que se realicen en ella. Para los en hora punta se

ha considerado como variable fundamental de la atractividad de una zona el número de puestos de trabajo que existan en ella.

Bajo este planteamiento, las matrices que se obtendrían de los modelos, visto las hipótesis y condicionantes planteadas anteriormente, serán sensibles a los cambios de población como variable de generación, a la capacidad atractora de viajes de las zonas en forma de empleos localizados en ellas y al coste generalizado de desplazarse entre cada par  $ij$ . Hay que aclarar también que la formulación genérica del modelo gravitacional simplemente acotado cuenta entre sus factores con un  $K_j$  como factor de ajuste que permite incorporar el efecto de variables o características no consideradas. Normalmente es un factor que se utiliza en pocas zonas en las que se tenga alguna característica especial diferente del promedio.

$$T_{ij} = G_i \times \frac{A_j \times f(\tilde{C}_{ij}) \times K_{ij}}{\sum_j A_j \times f(\tilde{C}_{ij}) \times K_{ij}}$$

En este caso se ha optado por mantener es parámetro igual a 1.

Cabe reseñar que las funciones de impedancia que se van a utilizar es una función exponencial o una función gamma según el caso

$$f(\tilde{C}_{ij}^n) = \tilde{C}_{ij}^{n\alpha} \exp(\beta \tilde{C}_{ij}^n)$$

$$f(\tilde{C}_{ij}^n) = \exp(\beta \tilde{C}_{ij}^n)$$

Para el cálculo del coste generalizado compuesto para aquellos con disponibilidad de coche y por tanto con un árbol de elección modal coche, taxi o transporte público se ha utilizado la fórmula ampliamente documentada en la literatura específica (Wilson (1969), Williams (1977)) en la que el coste generalizado compuesto se define como:

$$\tilde{C}_{ij}^n = -\frac{1}{\lambda^n} \ln \sum_k \exp(\lambda^n \times CG_{ijk}^n)$$

donde los parámetros de esta función son los obtenidos por el modelo de reparto modal.

El modelo gravitacional se calibrará con referencia a las matrices de hora punta validadas para auto y transporte público. Eso quiere decir que se calibrará una función de impedancia del modelo gravitacional tal que refleje el equilibrio de movilidad, bajo la oferta de transporte existente en el escenario base de 2008, resumido en el histograma o distribución de viajes según el tiempo, distancia o coste generalizado.

Esta aproximación cumpliría con los requerimientos básicos identificados anteriormente para estimar la demanda potencial de metro en los escenarios futuros puesto que sería sensible a:

- Cambios en la población de origen
- Cambios en la atractividad de las zonas de destino
- Cambios en la estructura de costes de las relaciones OD

El resultado de este modelo sería una nueva matriz de viajes OD agregada (TP y Privado) en los diferentes escenarios y horizontes temporales.

Esta matriz posteriormente se distribuiría entre los diferentes modos atendiendo a la segregación de la población en estratos con diferentes preferencias de elección y en 2 grandes grupos  $\gamma$  y  $(1-\gamma)$  en función de la disponibilidad de coche para cada estrato asociada a la tasa de motorización y la tasa de ocupación media del vehículo tal y como se describe tanto en la estructura general del modelo como en la especificación del submodelo de elección modal.

La validación de los resultados en este modelo vendrán dados por la capacidad de presentar por parte del modelo las pautas de distribución de los viajes de la movilidad mecanizada en hora punta del año base 2008. En este caso, se persigue que la función parametrizada anteriormente reproduzca de la mejor manera posible la distribución usual de los desplazamientos según el criterio seleccionado.

### 3.3 Calibración de los submodelos de generación-atracción y distribución zonal

La calibración de este modelo ha arrojado los siguientes parámetros:

- Las tasas de generación para la hora punta obtenidas a partir las matrices de hora punta observadas o estimadas en el producto 2 son:

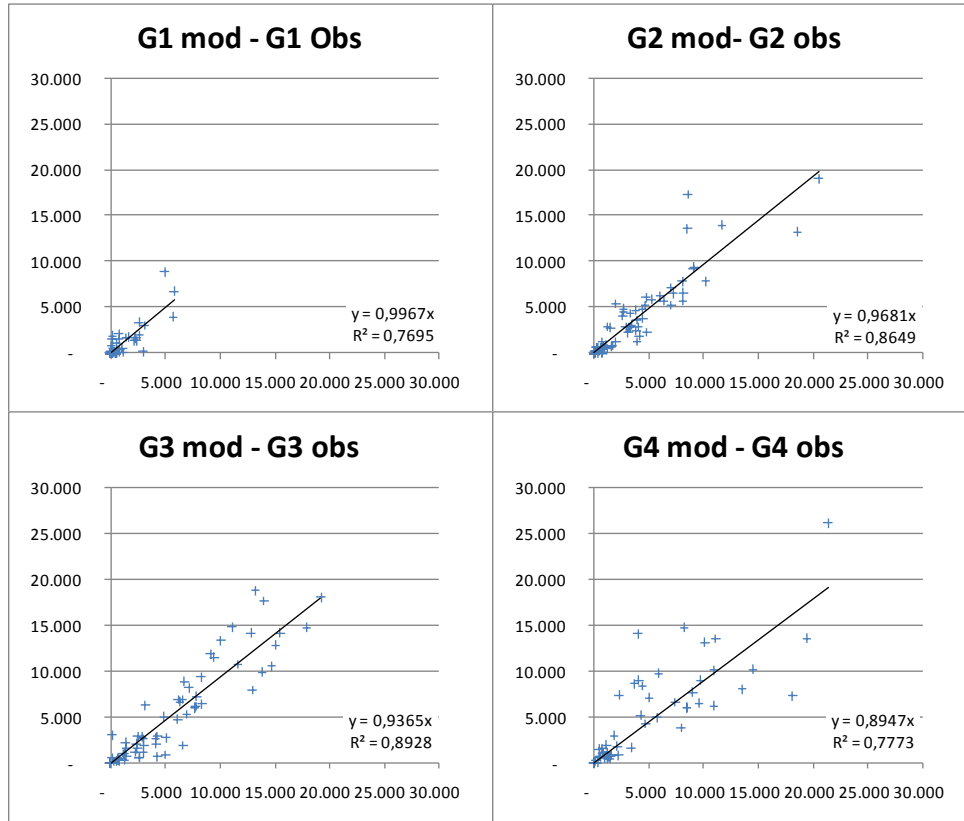
**Tabla 3-1- Tasas de generación de viajes en HP**

	<b>Estrato 1</b>	<b>Estrato 2</b>	<b>Estrato 3</b>	<b>Estratos 456</b>
Tasas de generación de viajes en hora punta	0.073	0.088	0.140	0.266

*Fuente: Elaboración propia*

Las correlaciones obtenidas entre las matrices de hora punta del producto 2 y los viajes generados por estrato predominante son altas principalmente en aquellas zonas cuyos estratos predominantes son los más numerosos en población como son los estratos 2 y 3. En el caso del conjunto de G4 que agrupa los estratos 456, se aprecia una mayor dispersión generada por la homogeneización de los 3 estratos a una misma tasa de generación.

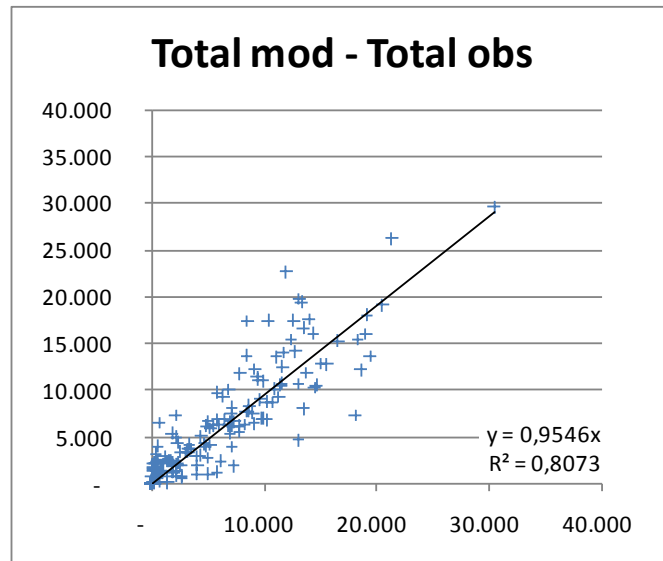
Figura 3-4 Correlación entre viajes generados por estrato predominante y viajes generados en las matrices del producto 2 a nivel de UPZ.



Fuente: Elaboración propia

El resultado final comparando el vector de generación de ambas fuentes de información (modelo del producto 3 y las matrices del año de referencia del producto 2) son bastante coherentes tal y como se muestra en la figura 3-5.

Figura 3-5 Correlación entre viajes totales generados con base la población y viajes generados en las matrices del producto 2.



Fuente: Elaboración propia

- Para el caso de los modelos de distribución, los parámetros de la función gamma para cada “segmento de demanda” calibrados son:

Tabla 3-2- Tasas de generación de viajes en HP

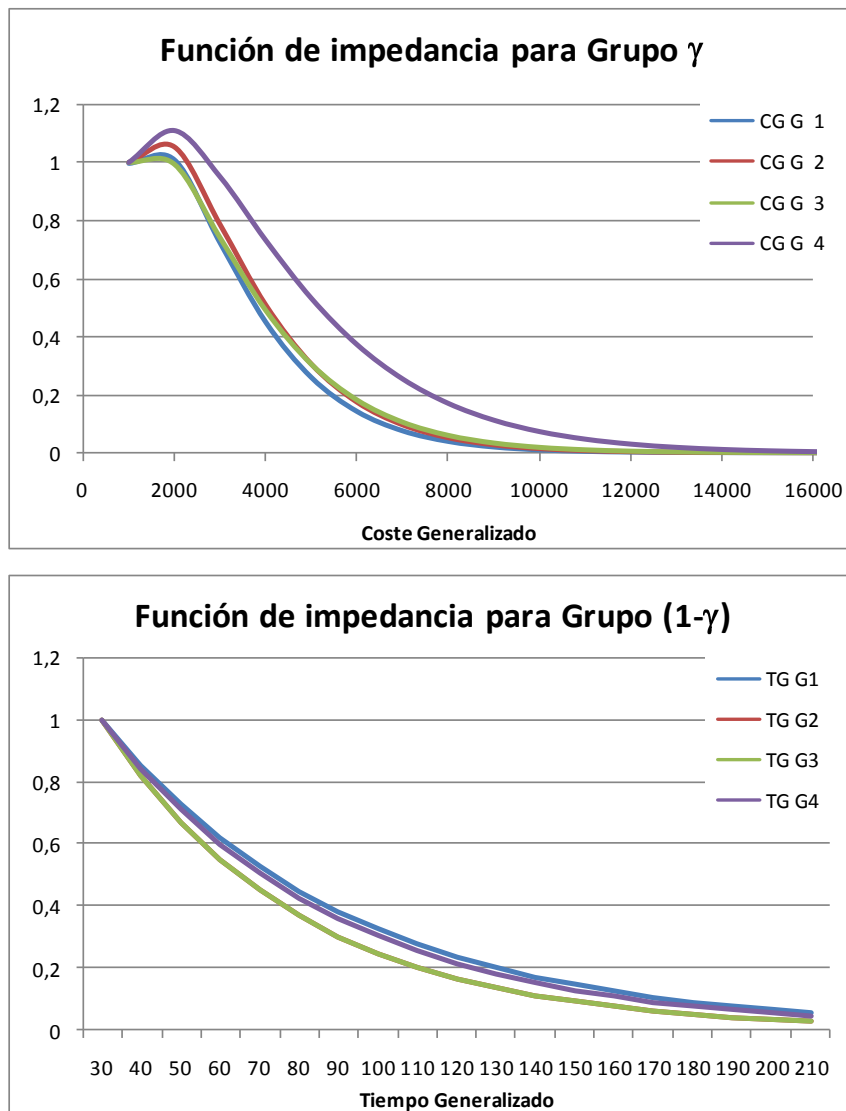
Segmento Demanda		Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estratos 4-5-6
$\gamma$	$\alpha$	1.2	1.2	1	0.9
	$\beta$	-0.00082	-0.00078	-0.0007	-0.00052
$(1-\gamma)$	$\alpha$	0	0	0	0
	$\beta$	-0.016	-0.02	-0.02	-0.017

Fuente: Elaboración propia

Mientras que para los primeros (con disponibilidad de vehículo privado) la calibración se realiza con el Coste Generalizado compuesto resultante de la integración para cada par ij del coste generalizado de las alternativas de coche y transporte público, en el caso de los no poseedores de coche, la calibración de la función de impedancia se realiza directamente con el tiempo generalizado resultante del modelo de asignación para transporte público.



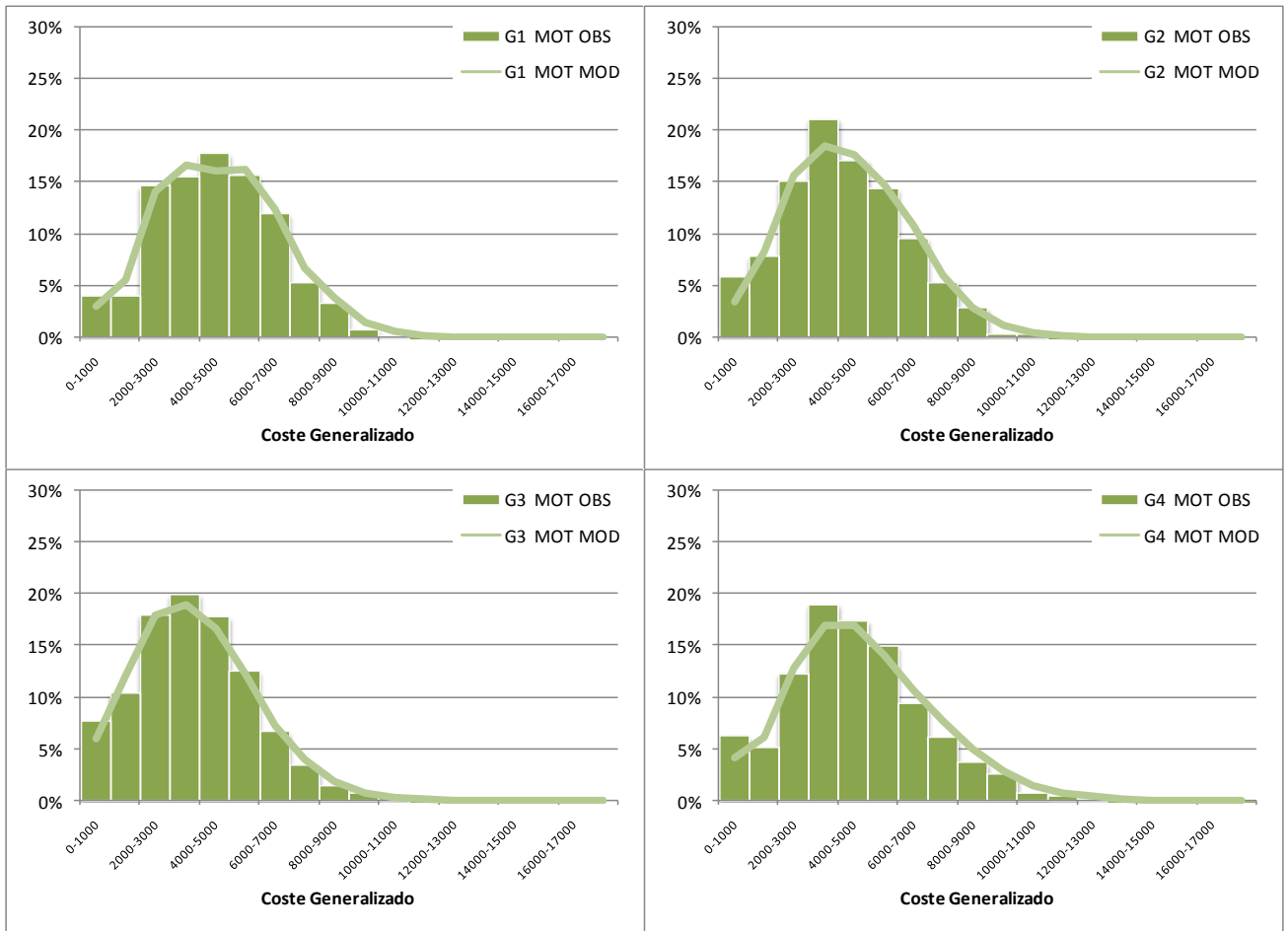
Figura 3-6 Funciones de Impedancia calibradas.



Fuente: Elaboración propia

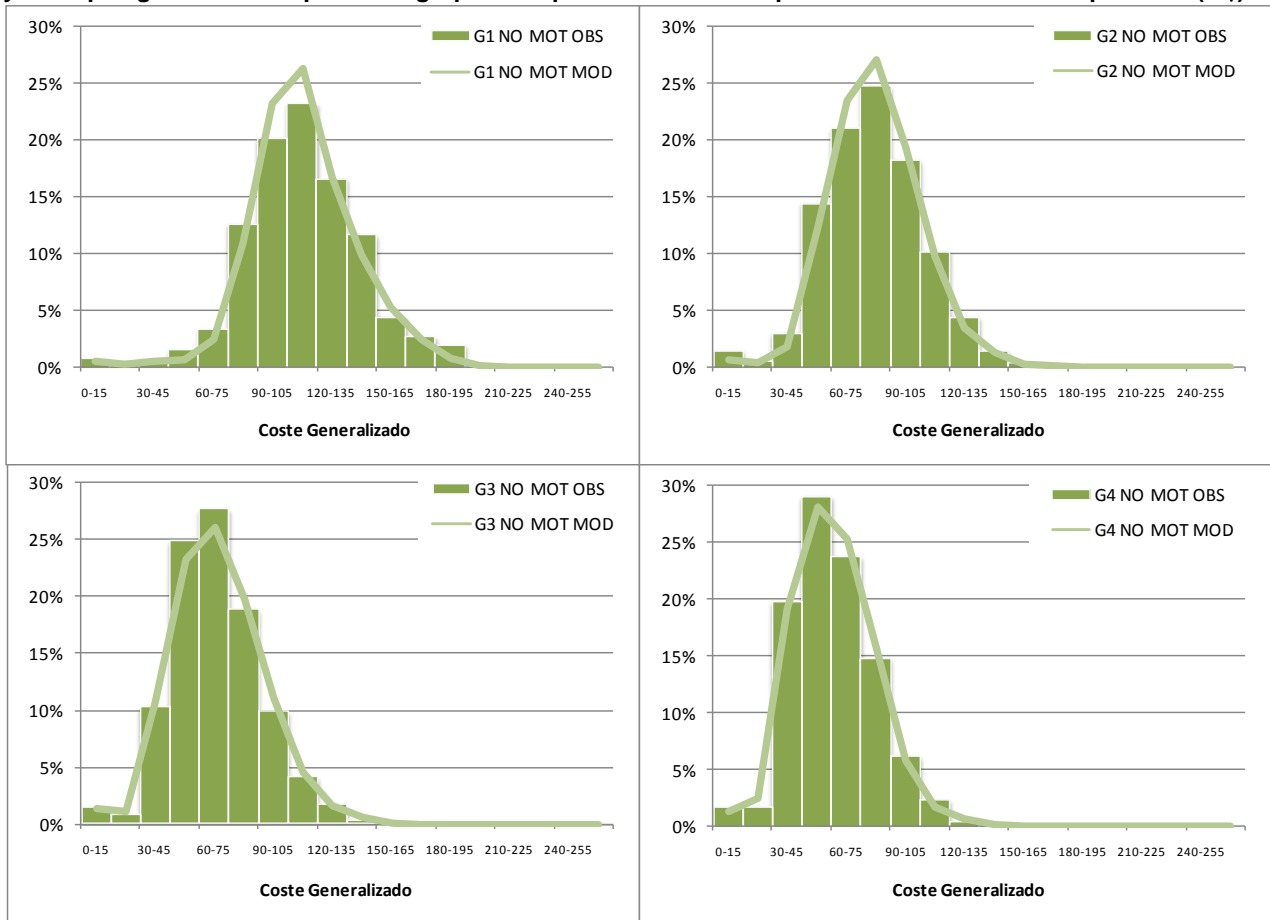
El resultado de la calibración arroja las siguientes distribuciones de viajes según tiempos o costes generalizados, según el caso, entre lo observado resultante de las matrices del producto 2 y lo modelado.

**Figura 3-7 Histograma de viajes modelados y observados (matrices producto2) según segmento de demanda y coste generalizado para el grupo de población con disponibilidad de vehículo privado  $\gamma$ .**



Fuente: Elaboración propia

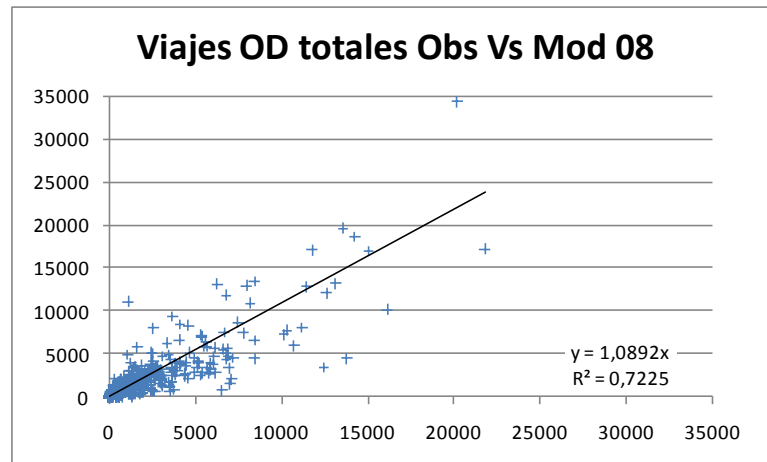
**Figura 3-8 Histograma de viajes modelados y observados (matrices producto2) según segmento de demanda y tiempo generalizado para el grupo de población sin disponibilidad de vehículo privado (1-γ).**



Fuente: Elaboración propia

El modelo generado para poder evaluar los cambios estructurales de la ciudad derivados de crecimientos de población o empleo es capaz de simular de forma bastante representativa la movilidad en hora punta de la ciudad, si bien su principal objetivo es medir cambios relativos entre los diferentes escenarios para poder aplicárselos a los viajes de las matrices base observadas (Producto2) mediante el factor de pivote.

Figura 3-9 Viajes del modelo de generación-distribución simplemente acotado en relación a la demanda base del 2008 (Producto 2) a nivel de UPZ.



Fuente: Elaboración propia

## 4 SUBMODELO DE ELECCIÓN MODAL

### 4.1 Consideraciones metodológicas previas del Submodelo de reparto modal

En el presente apartado se describe el proceso metodológico seguido para la estimación del modelo de reparto modal. Inicialmente, ha sido necesario definir la conceptualización del modelo, incluyendo el soporte teórico y las variables involucradas. Para la estimación de la captación, se han utilizado modelos de elección discreta que tienen su soporte en la Teoría de la Utilidad Aleatoria *TUA* (Domencich & McFadden, 1975) y cuyos fundamentos teóricos se presentan en el anejo A del presente documento.

Una vez lograda la definición de esquemas de modelación apropiados, se diseñó el trabajo de campo, para lo cual se tomó información de Preferencias Reveladas (PR) y de Preferencias Declaradas (PD), aplicadas a potenciales usuarios del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP). Esta información, complementada con los datos obtenidos de fuentes previas, entre las que se destaca la Encuesta Domiciliaria de Movilidad 2005, permitió la estimación y aplicación de los modelos de reparto modal.

La estimación de la demanda para el SITP involucra el análisis de todos los modos disponibles, tanto el transporte privado (auto, motocicleta, taxi<sup>3</sup>), como el transporte público (bus, metro urbano, tren de cercanías); este último considerando un sistema con integración operacional y tarifaria.

Insumo fundamental para el proceso de estimación de la demanda de cada uno de los modos involucrados lo constituye la información existente de la matriz de transporte público, y la Encuesta Domiciliaria de Movilidad 2005 - EDM\_2005. Estos datos permiten realizar estimaciones de generación de viajes y de elección modal. Aunque el tamaño de la encuesta no permite obtener matrices que cubran todos los pares origen-destino, puede ser usada como matriz a-priori o semilla para obtener la matriz definitiva, enriquecida con información de aforos.

Con el objeto de estimar los viajes entre cada par origen-destino  $ij$  por el usuario tipo  $q$  en el modo  $k$ ,  $V_{ij}^{qk}$ , se precisa la estimación de modelos de reparto modal. En atención a esto, se ha construido un modelo que permite estimar las cuotas modales que resultarían luego de la introducción de los nuevos modos de transporte (metro y tren de cercanías), en el marco de un sistema integrado de transporte público. La construcción de este modelo se realiza con base en la campaña de encuestas realizada y que se describe en el apartado siguiente.

### 4.2 Trabajo de campo

Se ha llevado a cabo un trabajo de campo cuyo resultado ha permitido al equipo consultor analizar la transferencia modal del transporte privado al público que pudiese ocurrir ante la introducción de nuevos modos de transporte como el metro y el tren de cercanías. La población objetivo está constituida por los potenciales usuarios del sistema metro en el marco de un Sistema Integrado de Transporte Público, enfatizando en los poseedores de vehículos, dada la cautividad hacia el transporte público de quienes no tienen acceso al transporte privado. En el análisis se ha incluido una tercera opción y es el taxi, de gran aceptación entre los poseedores de vehículo ya que su operación es muy similar. Por otra parte, y considerando quienes no tendrán acceso al metro, se ha considerado un cuarto modo y es el SITP, fundamentalmente basado en buses (troncales de Transmilenio y flexible complementario).

Partiendo de los datos disponibles (los resultados de la encuesta realizada en el 2007 y de la Encuesta de Movilidad 2005), para la selección de la muestra del trabajo de campo se ha seguido el siguiente procedimiento:

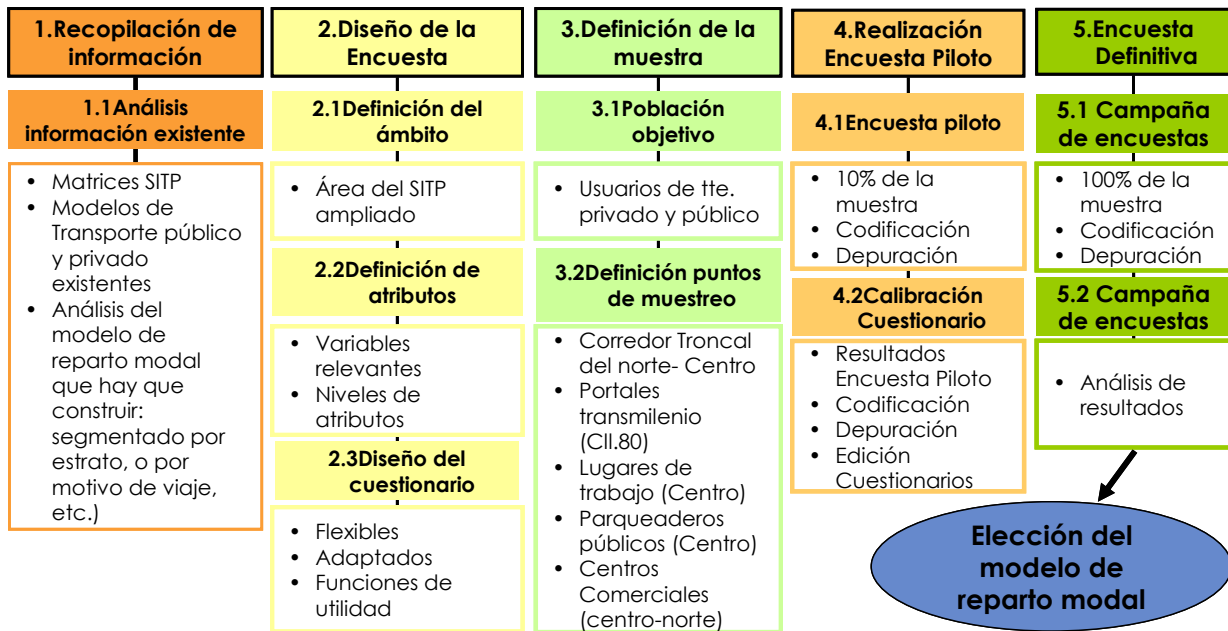
---

<sup>3</sup> Desde la perspectiva de la legislación colombiana, el taxi es un modo de transporte público. Sin embargo, su operación es más cercana al transporte privado.

- a. Segmentación de la demanda en grupos de comportamiento homogéneo respecto a la selección modal. Las variables de segmentación más relevantes son el ingreso, la posesión de vehículo y la ocupación. Se definieron las categorías de ingreso según la estratificación socioeconómica utilizada para tarificación de servicios públicos (estratos 1 a 6). A su vez, según la posesión de vehículo se definieron tres categorías: no poseedores de vehículos y por tanto cautivos del transporte público, usuarios con un vehículo en el hogar y usuarios con dos o más vehículos en el hogar. Finalmente, según la ocupación se consideró dos categorías: estudio y trabajo. Es importante resaltar que se encontró una fuerte correlación entre la posesión de vehículo y el número de autos.
- b. Determinación de la muestra para cada segmento de la población. Diseños eficientes de encuestas de PD permiten lograr buenos modelos con menos datos que los requeridos cuando se trabaja con datos de PR. Aunque hay indicios respecto de que una muestra de 30 entrevistas por segmento puede ser suficiente, investigaciones sugieren al menos entre 75 y 100 entrevistas por segmento (Bradley & Kroes, 1990; Swanson et al, 1992; Nerella, S. & Bhat, C., 2004). En el trabajo de campo realizado, se encuestó un total de 1150 individuos. A cada uno de ellos se le presento un juego de nueve situaciones de elección, lo que resulta en un total de 10.125 pseudo-individuos. Este tamaño muestral permitió cubrir de manera suficiente cada uno de los segmentos en que fue dividida la población.
- c. Selección del ámbito geográfico para la muestra. La zona que se trabajó fue específicamente el centro expandido de la ciudad (calle 6 “centro” y calle 100, entre los cerros orientales y la Avenida Caracas extendida a la calle 100 con Autopista Norte). La elección se hizo considerando que es el área de la ciudad que más viajes demanda, dada la presencia en ella de oficinas, instituciones educativas, de manera que allí hay una importante concentración de la población objeto del estudio. La encuesta fue aplicada en oficinas, instituciones educativas, centros comerciales, entre otros.
- d. Reparto de la muestra de cada segmento entre los diversos ámbitos geográficos. Por su condición, la muestra fue dividida convenientemente según la ocupación, de manera que el 65% trabaja, el 25% estudia y el 10% tenía otra ocupación. Por su parte, según estratos, el 4% de la muestra corresponde a ingresos bajos, el 70% a ingresos medios y el 26% a ingresos altos. Esta distribución se explica porque la encuesta fue aplicada a poseedores de vehículos.

La siguiente figura muestra esquemáticamente la metodología seguida durante el trabajo de campo necesario para la estimación del modelo de partición modal. Debe hacerse énfasis que se partió de una revisión de las matrices, modelos, estudios anteriores y encuestas previas de movilidad, etc., con el fin de determinar la estructura que el modelo de reparto modal debe tener, según las variables comunes y útiles para su construcción (por ejemplo, segmentos por estrato, o por motivo de viaje, etc.).

Figura 4-1 Metodología del trabajo de campo



Fuente: Elaboración propia

Entre los estudios revisados se pueden citar los siguientes:

- Encuesta de Movilidad 2005 – DANE
- Plan Maestro de Movilidad
- Modelo disponible en la ciudad (EMME/3) calibrado a 2007 por la consultoría del SITP,
- Estudio del Corredor Calle 26 y Cra 7ª (Encuestas de Preferencias Declaradas),
- Actualización y validación de las matrices de transporte público y revisión de la base de datos de oferta física y operativa del modelo de transporte de la ciudad de Bogotá. DG Consultora - CAL Y MAYOR ASOCIADOS Contrato 153 de 2006.
- Diseño técnico, legal y financiero de sistema integrado de transporte público para la ciudad de Bogotá D.C,
- Reformulación del plan vial del POT- STEER DAVIES GLEAVE. 2005,
- Estudio de demanda para el tren de cercanías de la sabana de Bogotá -2000
- Asistencia técnica a la STT para la reorganización del TPC por la entrada en la operación de la Fase II del Sistema Transmilenio -2003- (FONDATT-STT)
- Diseño conceptual del SITM de la Sabana de Bogotá -1997 - DNP-FONADE
- Estudio actualización de la demanda del SITM -1999 - DNP-IDU
- Plan de Ordenamiento Territorial -2000- (SDP) - Unidades de Planeamiento Zonal -2000 - (SDP),
- Formulación del Plan Maestro de Movilidad para Bogotá -2006- (FONDATT-STT)

- Actualización y validación de las matrices de TP y revisión de la Base de Datos de Oferta física y operativa del modelo de transporte de la ciudad de Bogotá -2007 - (FONDATT-STT)

#### 4.2.1 Diseño de la encuesta

El instrumento aplicado incluye varias partes, tal como se aprecia en la Figura 4-2. La primera hace referencia a información socioeconómica del encuestado, destacando ocupación, estrato socioeconómico, vehículos en el hogar, género, edad y estructura del hogar. La segunda, es una encuesta de preferencias reveladas en la cual se pregunta sobre el viaje realizado, incluyendo información sobre el motivo, hora, frecuencia y tanto para el modo escogido como para los modos alternativos, costos, tiempos de viaje, tiempos de acceso y transbordos.

Otra parte de la encuesta son las preguntas de preferencias declaradas, cuyo diseño tuvo en cuenta las siguientes etapas:

- a. Definición del ámbito de elección. Dado el interés en estimar la demanda del Metro se generaron escenarios hipotéticos de elección contrastando el SITP, considerando como columna vertebral el metro, con modos alternativos, siendo ellos el auto particular y el taxi. Es importante resaltar que en el SITP, al aplicar la encuesta se fue muy claro que incluye además el sistema BRT (Transmilenio), y el sistema flexible complementario, con integración operacional y tarifaria. En el juego, el individuo debía escoger la alternativa de su conveniencia en atención a los atributos allí indicados, siendo una encuesta del tipo "elección". Puede notarse que en un conjunto de encuestas se confrontó el SITP tomando como eje el Metro con el auto particular y el taxi, y en otro se confrontó el SITP tomando como eje el sistema troncal sobre buses (Transmilenio) con el auto particular y con el taxi.
- b. Diseño preliminar de la encuesta. Para este diseño inicial, fueron escogidas inicialmente las variables relevantes, y el número de niveles de cada una. El análisis llevó a considerar las variables tiempo de viaje en vehículo, tiempo de acceso (incluye caminata y espera), costo y transbordos. Siguiendo las últimas tendencias, se procuró diseños eficientes, que permiten mejor aprovechamiento de los datos que los tradicionales diseños puramente ortogonales (Zandor, 2002)
- c. Realización de grupo focal. Se utilizó la técnica de grupos focales, orientado por un experto para obtener información útil. El diseño inicial fue presentado a un conjunto de 15 personas, representativo de la población a estudiar, para obtener retroalimentación que permitiese mejorar el instrumento. Aspectos como el lenguaje, las variables y los niveles en que se encontraban, el ámbito de elección y otros fueron evaluados por el grupo, obteniendo información útil para revisar el diseño preliminar. Los encuestadores proporcionaron información de gran valor sobre las tarifas y costos y el proceso por el cual toman las decisiones de viajes. Un aspecto importante fue el procurar diseños adaptivos a las características del viaje del individuo; por ello, se preparó una encuesta para viajes cortos y otra para viajes largos.
- d. Aplicación de encuesta piloto. El diseño mejorado fue probado mediante la realización de una prueba piloto, aplicada a un conjunto de 69 individuos. La prueba piloto permitió verificar la pertinencia del instrumento y evaluar variables como los tiempos de aplicación y la recepción de la encuesta. Además, fue una instancia de entrenamiento para el personal de encuestadores y supervisores. Los resultados de la encuesta permitieron estimar modelos preliminares y verificar su consistencia microeconómica. Se encontró que los atributos y niveles definidos permitían recuperar los parámetros correspondientes de la función de utilidad. En síntesis, la prueba piloto permitió afinar el diseño del instrumento definitivo.



- e. Aplicación de la encuesta. En los sitios escogidos se llevó a cabo el trabajo de campo, aplicando un muestreo aleatorio dentro de cada estrato. En total fueron entrevistados 1150 individuos, de los cuales a 1050 se les confrontó el SITP considerando como eje troncal el metro, en tanto que a 100 de ellos se les confrontó el SITP considerando como eje troncal el sistema sobre buses (Transmilenio). La aplicación de la encuesta se realizó utilizando personal debidamente entrenado y con el apoyo de supervisores de la labor de campo. Las encuestas aplicadas fueron revisadas inmediatamente a fin de garantizar su completitud y consistencia. Posteriormente, con la información obtenida se configuró una base de datos que permitió su manipulación.
- f. Estimación de modelos. A partir de los datos de la encuesta se procedió a estimar los modelos de elección involucrando las diferentes alternativas. En cada uno de ellos se realizó la correspondiente evaluación a la luz de criterios estadísticos y de consistencia microeconómica.
- g. Aplicación de modelos. El modelo de elección modal se aplicó a cada par origen-destino para así estimar la demanda de cada modo alternativo.

#### 4.2.2 Definición de atributos y niveles

El enfoque de la encuesta está dirigida a usuarios de vehículo particular y taxi en sus viajes más frecuentes a su lugar de actividad (trabajo y estudio principalmente).

Después de haber analizado la situación del transporte urbano en la región metropolitana de Bogotá y teniendo en cuenta los antecedentes que se tienen sobre el tema, se llegó a la conclusión de que los aspectos más relevantes al momento de decidir qué modo de transporte elegir son: el costo, el tiempo de viaje y el tiempo de acceso. Estas fueron las variables consideradas en el estudio, para el caso del automóvil y del taxi.

En el caso del transporte público que para efectos de este estudio será el SITP se agrega otra variable que es el número de transbordos. Para el caso del SITP en unas encuestas se asoció con la operación de un metro, con posibilidad de transbordo integrado con Transmilenio y rutas alimentadoras; en otro conjunto de datos se asoció a un SITP en el cual el recorrido troncal se realiza en un sistema sobre buses (Transmilenio), con posibilidad de transbordo. Hubo otras variables consideradas en el diseño original que fueron la seguridad y el confort; sobre esta última en el grupo focal se notó la diversidad de interpretaciones: algunos lo asociaban con la ocupación del vehículo (lleno o vacío), otros lo asociaban a la cola en paraderos, otros lo asociaban al estado de los vehículos o a la tecnología. Como resultado del grupo focal y de la prueba piloto se optó por explicar parcialmente el efecto de estas variables, que hacen referencia a percepciones, a través de la constante modal; ello además, permite un diseño menos complejo, dado que incluir una quinta en el diseño incrementa sustancialmente el diseño experimental lo cual puede redundar en los resultados (Caussade et al, 2005)

El costo o tarifa está definido en caso de automóvil como el costo del estacionamiento más un costo de operación, dado principalmente por el consumo de combustible; a su vez, el costo del taxi y del transporte público está representado en la tarifa del pasaje. El tiempo de viaje se definió como el tiempo en movimiento, separado del tiempo de acceso que incluye los tiempos de caminata antes y después de abordar el vehículo y el tiempo de espera en paradero o en espera del taxi. Un transbordo es cada intercambio vehicular entre modos motorizados (sin incluir la caminata ni la bicicleta), y se supuso que éstos se realizan sin que medie un nuevo pago, dado que se trata de un sistema con integración tarifaria. En caso de que haya un pago por transbordo, este se deberá considerar en la tarifa.

Para el diseño, los atributos tarifa y tiempo de viaje fueron tratados en tres niveles tomando un valor nominal referencial de acuerdo con los valores actuales. Para el atributo tiempo de acceso se consideró dos niveles. En el caso de transbordo se trabajó con dos niveles (0 y 1 transbordo) para viajes cortos, definidos como aquellos que son menores de 30 minutos; y tres niveles (0, 1 y 2 transbordos) para viajes largos entendidos como aquellos mayores de 30 minutos.

Con el objeto de recolectar esta información de los valores actuales, fue necesario realizar una investigación de mercado, complementada con la información tomada del grupo focal, en el cual se mostraron las alternativas, los atributos y los escenarios, con el fin de que los individuos evaluaran si los valores presentados correspondían a la realidad. En el diseño experimental, el conjunto de elecciones estaba constituido por dos alternativas.

La combinación de niveles define distintos escenarios que constituyen el diseño experimental. La práctica más común ha sido la de usar diseños ortogonales, lo cual implica asegurar que cada atributo varía independientemente de los demás, de forma que se pueda aislar su efecto en la función de utilidad indirecta. La ortogonalidad está asegurada cuando se consideran todas las combinaciones posibles de los niveles de las variables; esto se constituye en un diseño factorial completo, que crece exponencialmente con el número de atributos y niveles.

Un diseño factorial completo permite estimar no sólo los efectos aislados de todos los atributos sino también todas las posibles interacciones entre ellos. El problema es que en estos casos el número de escenarios puede ser muy elevado y el experimento puede producir fatiga en el entrevistado. En el caso de este estudio, en los viajes largos el número de escenarios es  $54 = 3^{3*2}$ , mientras que para los viajes largos es  $36 = 3^{2*2^2}$ . Por tanto, lo que se suele hacer en la práctica, y es de hecho lo realizado en este estudio, es utilizar un diseño factorial fraccionado, que consiste en seleccionar solo un subconjunto de escenarios del diseño factorial completo. Sin embargo, en la gran mayoría de las aplicaciones empíricas, se observa que los efectos lineales explican alrededor de un 70 - 90% de la varianza observada – condición de monotonicidad en los efectos lineales (Hensher, Louviere y Swait, 1999); esto sugiere, en diseño experimental, considerar principalmente efectos lineales, y, si hubiese motivos, alguna(s) interacción(es) dobles y/o algún(os) efecto(s) cuadrático(s).

Si bien los diseños ortogonales son un excelente punto de partida, en este caso se utilizó el criterio de “diseños eficientes” (Rose et al, 2008; Huber & Zwerina, 1996; Zandor, 2002, Street et al, 2005). Un experimento se considerará eficiente si los parámetros estimados con los datos recolectados de su aplicación son confiables (baja magnitud de sus errores estándar). Por lo tanto, es interesante comparar diseños mediante la matriz de covarianza asociada a los parámetros; ésta matriz es la inversa de la matriz de información obtenida de la aplicación del experimento, a partir de la función de log-verosimilitud asociada al modelo. Para lograr este diseño, se utilizó como información preliminar los parámetros de modelos de selección modal previamente calibrados en Bogotá.

Atendiendo a la recomendación de presentarle al usuario no más de 9 o 10 escenarios, el diseño del experimento presenta únicamente 9 escenarios. El diseño ortogonal base fue tomado de Kocur et al (1982) y resulta ser el siguiente:

**Tabla 4-1- Escenarios del Experimento**

1111	2122	3113
1212	2213	3221
1323	2311	3312

*Fuente: Elaboración propia*

Este diseño es una fracción del original, en el cual no se tienen en cuenta las interacciones de segundo orden o de orden superior y se puede probar que es ortogonal. Ahora bien, esta fracción representa el diseño en caso de una alternativa; es decir, un modo que viaje desde un origen a un destino determinado. Dado que en los escenarios se presentan 2 alternativas para cada par origen – destino, es necesario determinar el orden de estos 9 escenarios para cada una de ellas. Para definir los conjuntos de elección se utilizó teniendo en cuenta los balances de utilidades sugeridos por Huber y Zwerina (1996). Se evaluaron distintas alternativas de grupos de elección y combinación de niveles en los atributos para generar las diferentes encuestas, una para viajes cortos, otra para viajes largos y, dependiendo de si tienen o no disponible su vehículo particular en ese día, se confronta con el auto o con el taxi. La

construcción de los diseños implicó utilizar las técnicas de intercambio de niveles (swapping) y reetiquetamiento (relabelling) (Huber & Zwerina, 1996; Hensher, Louviere & Swait 2000; Sándor & Wedel, 2001; Sándor & Wedel, 2002).

En el juego se contrastó el SITP con el auto y con el taxi, considerando en ambos casos escenarios de viajes cortos y viajes largos. Los niveles empleados en los diseños se presentan en la Tabla 4-2 para los viajes largos y en la Tabla 4-3 Niveles de atributos para viajes cortos. Los diseños obtenidos se presentan en la Tabla 4-4.

**Tabla 4-2 Niveles de atributos para viajes largos**

	SITP (Metro – Transmilenio)			Transporte Privado (Auto – Taxi)		
	1	2	3	1	2	3
Costo	1500	1800	2100	4000	5500	7000
Tiempo de Viaje	20	25	30	30	40	50
Tiempo de Acceso	10	20		5	10	
Transbordo	0	1	2			

Fuente: *Elaboración propia*

**Tabla 4-3 Niveles de atributos para viajes cortos**

	SITP (Metro – Transmilenio)			Transporte Privado (Auto – Taxi)		
	1	2	3	1	2	3
Costo	1500	1800	2100	3000	4500	6000
Tiempo de Viaje	10	15	20	10	20	30
Tiempo de Acceso	10	20		5	10	
Transbordo	0	1				

Fuente:

*Elaboración*

*propia*

Como se ha indicado, la encuesta de preferencias declaradas se complementa con una encuesta de datos de PR, que está dividida en tres partes: la primera está relacionada con la disponibilidad de auto particular para la realización del viaje, bien sea en calidad de conductor o de acompañante. Si la respuesta es afirmativa, se continúa adelante con la encuesta, en caso contrario se le agradecerá al encuestado y en ese momento se termina la encuesta.

La segunda parte de la encuesta PR está relacionada con la identificación del encuestado, en cuanto su ocupación, edad y sexo. Estas variables aunque que pudieran ser incluidas en el modelo, son además importantes en el momento de revisar que las encuestas no estén sesgadas a cierto tipo de población, y que, por el contrario, se garantice tienen una representación razonable del mercado.

En la tercer parte se indaga sobre el viaje más reciente en modo particular, para el periodo de máxima demanda en la mañana (06:00 - 09:00 horas), detallando los atributos del viaje. Es importante conocer de alguna manera, los atributos del modo alterno del usuario, por ejemplo cuando tiene restricción vehicular, además de información general del encuestado: ingresos, ocupación, motivo del viaje, edad, sexo entre otros conceptos de información socioeconómica. El diseño de esta encuesta se muestra en la Figura 4-2, y se complementa en la Figura 4-3 y en la Figura 4-4.

**Tabla 4-4- Diseño encuesta de preferencias declaradas PD1**

	Alternativa 1		Alternativa 2	
	Tiempo de viaje	Costo	Tiempo de viaje	Costo
1	0	0	0	0
	0	0	0	0
	0	0	0	0
	0			
2	0	1	1	1
	1	1	1	1
	0	0	0	0
	1			
3	0	2	2	0
	2	0	0	0
	1	1	1	1
	0			
4	1	0	2	1
	0	0	1	1
	1	1	1	1
	1			
5	1	1	0	2
	1	1	2	2
	0	0	1	1
	1			
6	1	2	1	0
	2	0	0	1
	0	0	1	1
	0			
7	2	0	0	1
	0	0	1	1
	0	0	0	0
	0			
8	2	1	1	2
	1	1	2	2
	1	1	0	0
	0			
9	2	2	2	2
	2	2	2	2
	0	0	1	1
	1			

Fuente: Elaboración propia

Como se indicó anteriormente, el muestreo para el tema de encuestas de preferencias declaradas es un tema bastante complejo y se puede resumir en las siguientes 2 preguntas: ¿Quién debe ser encuestado? y ¿Cuántas encuestas deben ser realizadas? Atendiendo a la primera pregunta, se puede decir que la población objetivo de esta investigación son personas que realizan su viaje cotidiano en las horas punta de la mañana y que tienen acceso al vehículo particular para realizar ese viaje, bien sea hombre o mujer mayores de 18 años. A los usuarios se les aplicó la encuesta en su lugar de trabajo o de estudio.

En referencia al muestreo, para la construcción de los modelos, un total de 1150 individuos encuestados constituyen la muestra, información que puede ser utilizada para estimar modelos de PR. En el caso de los datos de PD, dado que se tienen nueve observaciones por individuo, hay disponibles 10125 pseudo-individuos.

Los cuadernillos utilizados y una descripción del desarrollo del experimento pueden consultarse en el anexo B del presente producto, como ilustración, en la Figura 4-5 y en la Figura 4-6. se presentan ejemplos de las opciones de elección de los individuos.

Figura 4-2 Cuestionario para Encuestas de PR y PD



## PROYECTO METRO BOGOTÁ

Encuesta de Preferencias a Usuarios de Vehículo Particular



### 1. IDENTIFICACION DE LA ENCUESTA

Lugar	<input type="text"/>	Fecha	<input type="text"/> / <input type="text"/> / <input type="text"/>	Folio	<input type="text"/>
Encuestador	<input type="text"/>	Digitador	<input type="text"/>	Hora	<input type="text"/>

### 2. IDENTIFICACION DEL USUARIO

¿Dispone de vehículo para realizar en él su viaje cotidiano?		Ocupación			Género		Edad	
Sí <input type="checkbox"/>	Conductor <input type="checkbox"/>	Estudiante <input type="checkbox"/>	Directivo <input type="checkbox"/>	Femenino <input type="checkbox"/>	18 - 25 ANOS	<input type="checkbox"/>	26 - 35 ANOS	<input type="checkbox"/>
	Acompañante <input type="checkbox"/>	Empleado <input type="checkbox"/>	Profesional <input type="checkbox"/>	Masculino <input type="checkbox"/>	36 - 45 ANOS	<input type="checkbox"/>	> 45 ANOS	<input type="checkbox"/>
No <input type="checkbox"/>	→ detener encuesta		Independiente <input type="checkbox"/>	Técnico <input type="checkbox"/>				
		Otro <input type="checkbox"/>	Auxiliar <input type="checkbox"/>					

### 3. INFORMACION DEL VIAJE

¿Utilizó vehículo particular para realizar su viaje cotidiano en esta mañana?	¿A qué horas inició su viaje?	¿Qué modo alternativo utilizó?	¿Cuál fue el motivo de su viaje?
Sí <input type="checkbox"/>	<input type="text"/> :	<input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> TM <input type="checkbox"/> TX	Trabajo <input type="checkbox"/>
No <input type="checkbox"/>	→ Pico y Placa <input type="checkbox"/>		Estudio <input type="checkbox"/>
	Otro <input type="checkbox"/>		Otro <input type="checkbox"/>
	¿A qué horas terminó su viaje?		¿Con qué frecuencia realiza este viaje a la semana?
	<input type="text"/> :		<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5

#### VIAJE EN AUTO

Tiempo de Viaje	Costo del viaje (Incluye parqueadero)	¿Cuántas cuadras camina al parqueadero?
<input type="text"/> :	<input type="text"/>	Cuadras <input type="text"/>

#### VIAJE EN TRANSMILENIO O BUS

Tiempo de Viaje	Costo del viaje	¿Cuántas cuadras camina al paradero?	¿Cuánto tiempo espera en el paradero?	Transbordos
<input type="text"/> :	<input type="text"/>	Cuadras <input type="text"/>	Minutos <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2

#### VIAJE EN TAXI

Tiempo de Viaje	Costo del viaje	¿Cuántas cuadras camina para tomar el taxi?	¿Cuánto tiempo espera el taxi?
<input type="text"/> :	<input type="text"/>	Cuadras <input type="text"/>	Minutos <input type="text"/>

Figura 4-3 Cuestionario para Encuestas de PR y PD (2)



**PROYECTO METRO BOGOTÁ**  
Encuesta de Preferencias a Usuarios de Vehículo Particular



**4. PREFERENCIAS DECLARADAS**

Considere el viaje que usted ha realizado. A continuación le mostraremos nueve situaciones en las que usted deberá escoger entre Metro, Taxi o Automóvil Particular. Las tres alternativas cambiarán en cuanto al tiempo de viaje, al costo y al tiempo de acceso

<input type="checkbox"/> PD N°	<input type="text" value="1"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="2"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="3"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="4"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="5"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="6"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="7"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="8"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="9"/>	Automóvil <input type="checkbox"/>	Metro <input type="checkbox"/>	Taxi <input type="checkbox"/>

**5. INFORMACION SOCIOECONOMICA**

Número de autos en hogar       Número de personas en hogar     ¿En qué barrio vive? \_\_\_\_\_    ¿En qué estrato vive? \_\_\_\_\_

Modelo del Vehículo \_\_\_\_\_

**OBSERVACIONES**

---



---



---

Figura 4-4 Cuestionario para Encuestas de PR y PD (3)



**PROYECTO METRO BOGOTÁ**  
Encuesta de Preferencias a Usuarios de Vehículo Particular





4. PREFERENCIAS DECLARADAS							
<p>Considere el viaje que usted ha realizado. A continuación le mostraremos nueve situaciones en las que usted deberá escoger entre Metro, Taxi o Automóvil Particular. Las tres alternativas cambiarán en cuanto al tiempo de viaje, al costo y al tiempo de acceso</p>							
<input type="text"/> PD N°	<input type="text" value="1"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="2"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="3"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="4"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="5"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="6"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="7"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="8"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
	<input type="text" value="9"/>	Automóvil	<input type="checkbox"/>	SITP	<input type="checkbox"/>	Taxi	<input type="checkbox"/>
<p>SITP: Sistema Integrado de Transporte Público</p>							
5. INFORMACIÓN SOCIOECONOMICA							
Número de autos en hogar		<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="M"/>	Número de personas en hogar		<input type="text"/>
			¿En qué barrio vive?		¿En qué estrato vive?		<input type="text"/>
Modelo del Vehículo <input type="text"/>							
<b>OBSERVACIONES</b>							
<input type="text"/>							
<input type="text"/>							
<input type="text"/>							

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4-5 Opciones de Elección del Individuo (SITP – Metro)**

Las opciones que se muestran al individuo dependiendo si se realiza un viaje corto o largo, y si tiene o no pico y placa, se han estructurado por colores y de la siguiente manera:



*Viaje corto con pico y placa*

<b>1</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 1,500.00	10 MIN	10 MIN	0
		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 4,000.00	15 MIN	5 MIN	



*Viaje corto sin pico y placa*

<b>2</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 1,500.00	15 MIN	10 MIN	1
		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 4,500.00	20MIN	5 MIN	

*Viaje largo con pico y placa*

<b>7</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 2,100.00	20 MIN	10 MIN	2
		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 7,500.00	50 MIN	5 MIN	

*Viaje largo sin pico y placa*



<b>9</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 2,100.00	30 MIN	10 MIN	1
		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 6,000.00	30 MIN	5 MIN	

Fuente: Elaboración propia





Figura 4-6 Opciones de Elección del Individuo (SITP – Transmilenio)



Viaje corto con pico y placa

<b>1</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 1.500,00	10 MIN	10 MIN	0
		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 4.000,00	15 MIN	5 MIN	



Viaje corto sin pico y placa

<b>4</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 1.800,00	10 MIN	20 MIN	1
		<b>COSTO</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 6.000,00	20 MIN	10 MIN	

Viaje largo con pico y placa

<b>5</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 1.800,00	25 MIN	10 MIN	2
		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 6.000,00	40 MIN	5 MIN	

Viaje largo sin pico y placa

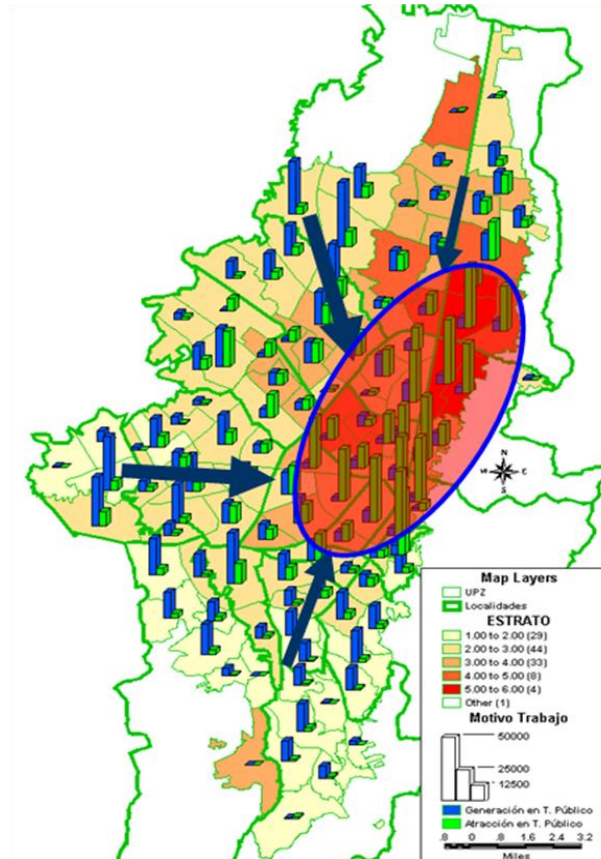
<b>3</b>		<b>TARIFA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	<b>TRANSBORDOS</b>
		\$ 1.500,00	30 MIN	20 MIN	2
		<b>COSTO</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>ACCESO</b>	
		\$ 7.000,00	50 MIN	5 MIN	

Fuente: Elaboración propia

### 4.2.3 Análisis de la información obtenida en terreno

Un aspecto fundamental para la programación de las labores de campo consistió en realizar una apropiada zonificación, la cual se refleja claramente en la Figura 4-7. Para ello fue necesario seleccionar lugares entre los que fueron incluidos centros educativos (universidades y centros tecnológicos), oficinas públicas y privadas, centros de salud, centros comerciales.

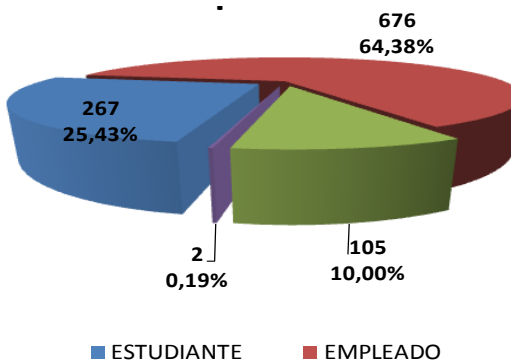
Figura 4-7 Zonificación del trabajo de campo



Fuente: Elaboración propia a partir de información gráfica del POT

Los entrevistados según ocupación se describen en la Figura 4-8. Nótese que cerca del 65% trabaja, el 25% estudia y el resto pertenece a otras categorías. En cuanto a género, el 58% de los entrevistados fueron hombres y el 42% mujeres.

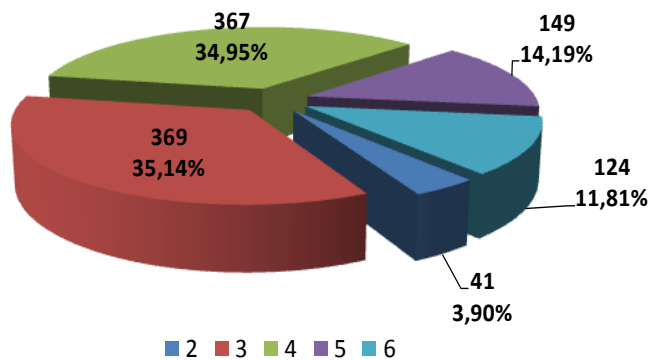
**Figura 4-8 Entrevistados según ocupación**



Fuente: Elaboración propia

La distribución de la muestra según estrato puede apreciarse en la Figura 4-9. Claramente los estratos 4 y 3 son mayoría, seguidos por los estratos 5 y 6. El estrato 2 es pequeño, inferior al 4%. No se encontró individuos de estrato 1 que fueran usuarios de automóvil.

**Figura 4-9 Distribución según estrato**



Fuente: Elaboración propia

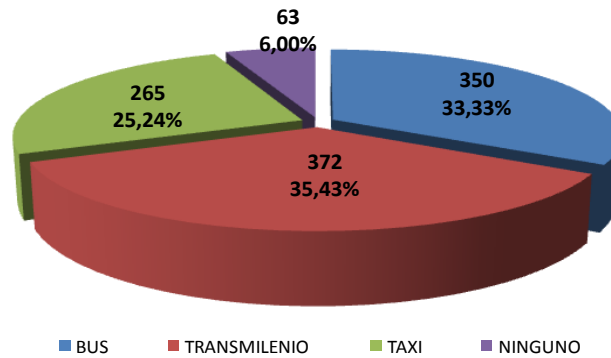
Cuando a los individuos se les consulta el modo alternativo considerado cuando no tienen acceso al auto, las respuestas son las que se presentan en la Figura 4-10. Allí se observa que en primera instancia se considera Transmilenio, seguido muy de cerca por el bus y luego el taxi.

Por su parte, la Figura 4-11 muestra que tres de cada cuatro viajes de la muestra se realiza con motivo trabajo, uno de cada cuatro con motivo estudio y una proporción muy pequeña por otros motivos.

En referencia a la motorización, la Figura 4-12 indica que el 62% de los entrevistados posee un vehículo, el 30% dos vehículos y un no despreciable 8% posee tres o más autos en su hogar. Como era de esperar, la mayor parte de estos últimos corresponde a los estratos 5 y 6; esto es, los de mayores ingresos.

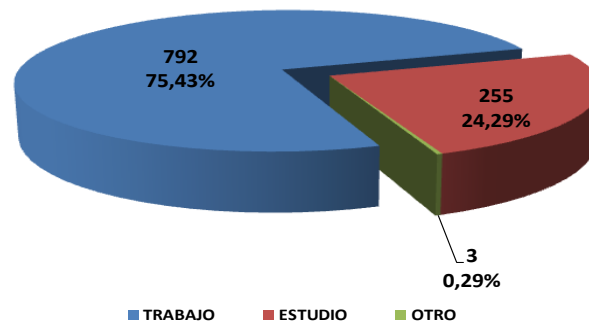
Un aspecto importante a resaltar es la proporción de individuos cautivos o lexicográficos, esto es, que siempre escogen un modo en atención a alguno de los atributos. En la muestra, hubo 234 individuos que reiterativamente escogían metro-SITP (20%), 121 que siempre escogieron auto privado (10%), y 6 que siempre tomaron taxi (0,5%).

**Figura 4-10 Modo alternativo al auto considerado**



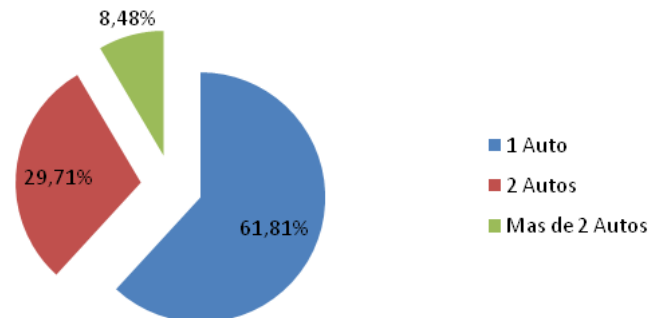
Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-11 Motivo del viaje**



Fuente: Elaboración propia

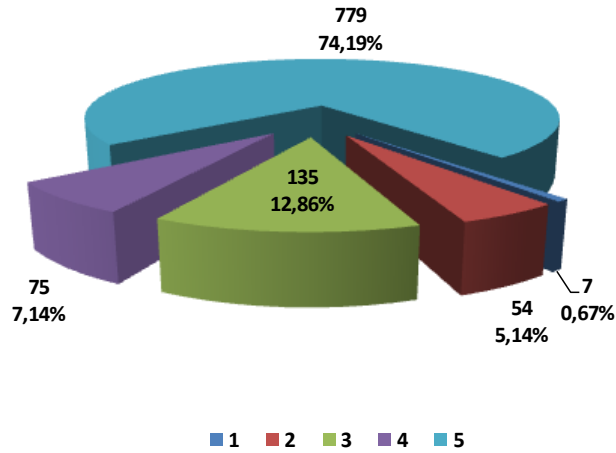
**Figura 4-12 Motorización de individuos encuestados**



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-12 muestra claramente que la mayor parte de los viajes son frecuentes y se realizan cotidianamente. Ello no es de extrañar teniendo en cuenta que la mayor parte de los registrados son viajes obligados, con motivos trabajo y estudio.

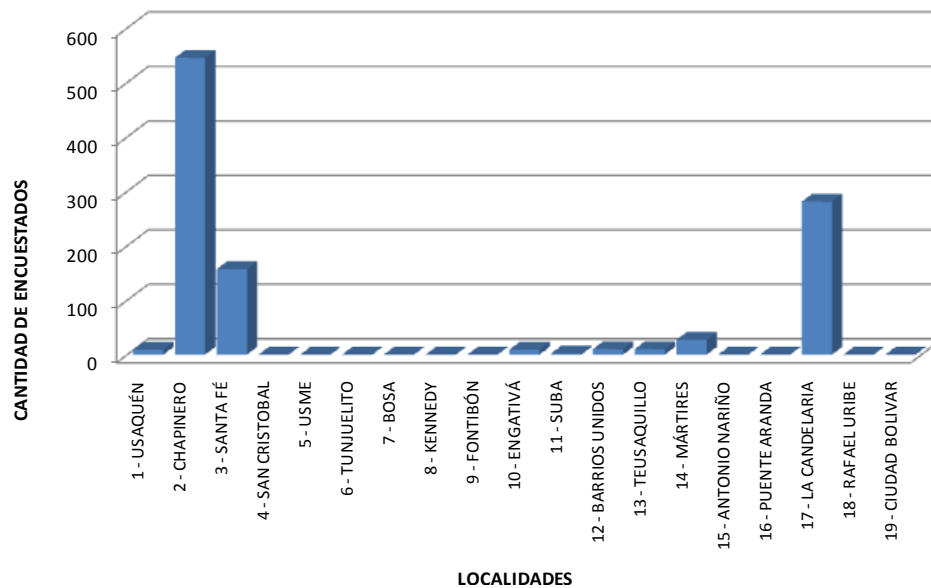
**Figura 4-13 Frecuencia de viaje**



Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se realiza un análisis global de los orígenes y destino de los viajes en la muestra escogida.

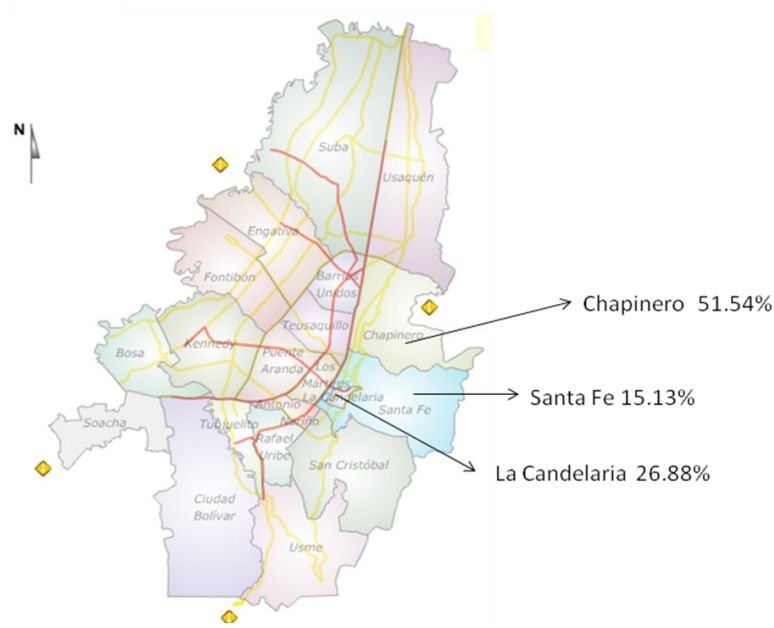
**Figura 4-14 Localidades según destino**



Fuente: Elaboración propia

Las localidades de mayor demanda son La Candelaria (centro de la ciudad) donde se manejan muchos centros gubernamentales y privados, la zona de Chapinero que extiende la zona centro en cuanto a centros educativos y comercio en general, seguida por la Localidad de Santa Fe que también queda en la zona céntrica de la ciudad.

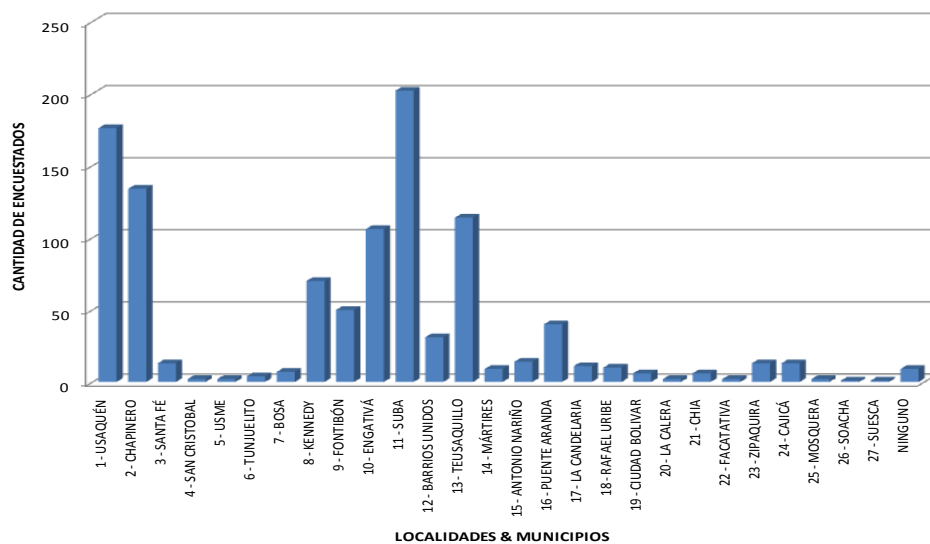
**Figura 4-15 Localidades según destino (2)**



Fuente: Elaboración propia

Por destino el área de influencia fue el centro expandido de la ciudad, lo que contempla entre la calle 100 y el centro (calle 6) y entre los Cerros Orientales y la Av. Caracas. Dentro de este se encuentra la Carrera 7ª la cual es una de las principales vías de la ciudad junto con la Av. Caracas.

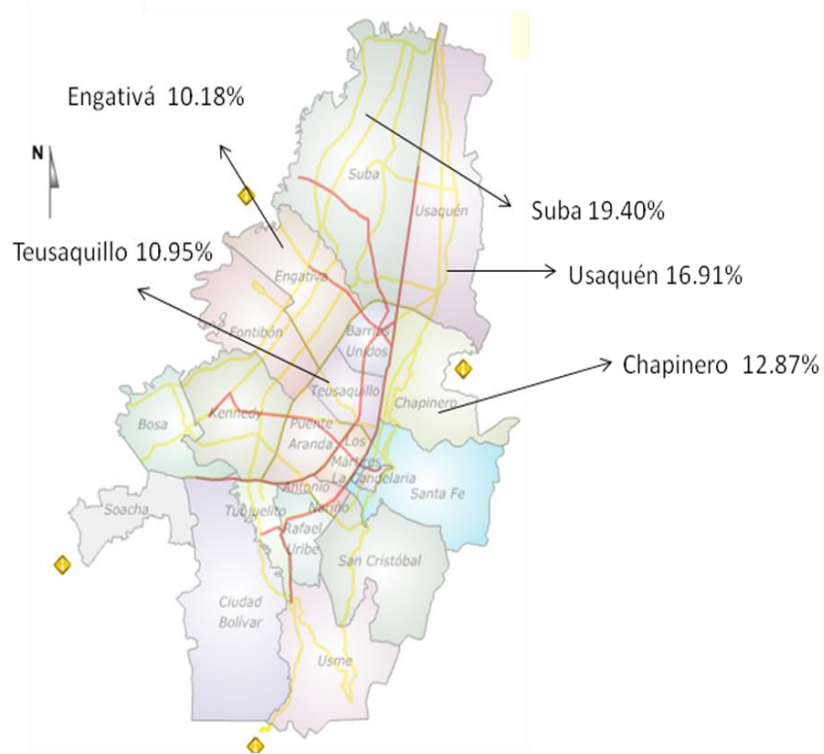
**Figura 4-16 Localidades por Origen**



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a origen hay de todas las localidades, en su mayoría localidades con mayor poder adquisitivo como es Usaquén, Suba y Chapinero; pero se ve que en todas en mayor o menor proporción hay utilización del vehículo particular para desplazarse al trabajo o estudio. También hay que tener en cuenta que resultaron encuestas con personas de origen de ruta de municipios aledaños a Bogotá lo cual da percepción sobre el proyecto de tren de cercanías y sobre el SITP.

**Figura 4-16 Localidades por Origen (2)**



*Fuente: Elaboración propia*

Por origen las localidades de mayor influencia fueron las de Suba, Usaquén, Chapinero, Engativa y Teusaquillo. Se reafirma que estas localidades abarcan la mayor proporción de usuarios del vehículo particular.

El proceso que sigue es aplicar el modelo entre cada par origen destino, incorporando los atributos y evaluar de esa manera la proporción de usuarios de auto que son captados por el sistema masivo.

### 4.3 Estimación de modelos de elección modal

Con la información tomada del trabajo de campo, se procedió a estimar modelos de partición modal. Los datos recogidos permiten obtener información de los modos disponibles por los individuos y del hogar, de sus características socioeconómicas, de los atributos de las alternativas y de las características del viaje, tal como se sintetiza en la siguiente tabla:

Tabla 4-5 Datos disponibles para estimación de modelos

Características del Individuo	Características Socioeconómicas del Hogar	Atributos de Alternativas	Características del Viaje
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Género               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1 hombre,</li> <li>○ 0 mujer</li> </ul> </li> <li>• Edad</li> <li>• Estrato Socioeconómico               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1 a 6</li> </ul> </li> <li>• Ocupación               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Empleado</li> <li>○ Independiente</li> <li>○ Estudiante</li> <li>○ Otro</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrato Socioeconómico               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1 a 6</li> </ul> </li> <li>• Número de Autos</li> <li>• Personas en el hogar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de Viaje (min)</li> <li>• Costo (\$COL)</li> <li>• Tiempo de Acceso (min)</li> <li>• Número de Transbordos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motivo               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Trabajo</li> <li>○ Estudio</li> <li>○ Otro</li> </ul> </li> <li>• Frecuencia</li> <li>• Hora</li> <li>• Origen y Destino</li> <li>• Modo elegido               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Auto</li> <li>○ SITP Metro</li> <li>○ SITP Transmilenio</li> <li>○ Taxi</li> </ul> </li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Los atributos de las alternativas fueron definidos como sigue:

- **Tiempo de viaje:** Es el tiempo (min) mientras el vehículo está en movimiento
- **Tiempo de acceso:** Es el tiempo (min) para acceder al vehículo, incluye caminata antes y después de abordarlo y el tiempo de espera en el caso del taxi y del bus.
- **Costo:** Es el costo (pesos colombianos) del viaje. En el caso de transporte público y taxi es la tarifa, en el transporte privado incluye costos de combustible y estacionamiento.
- **Transbordos:** Este atributo aplica al transporte público y se relaciona con el número de transbordos entre vehículos durante el viaje

A partir de los datos, se evaluaron distintos modelos, con distintas características en la definición de la matriz de covarianza, y en la forma funcional de la función de utilidad. Cada uno de los modelos es escrutado en correspondencia con criterios estadísticos y de consistencia microeconómica para finalmente escoger los que serán utilizados en la modalidad predictiva.

El proceso de evaluación de los modelos estimados implicó realizar las siguientes verificaciones:

- Consistencia de signos. Considerando la teoría microeconómica, se espera que en las variables tiempo, costo y transbordos la utilidad marginal sea negativa; por tanto, el signo de los parámetros en esos casos debe tener tal. En el caso del número de autos, debería tener una marginalidad positiva para la utilización del transporte privado. Debe indicarse que durante el análisis y selección de variables debe distinguirse aquellas que consideran relevantes o “de política”, como el costo, el tiempo de viaje y los transbordos, de aquellas que son complementarias (como el género); para ello, la Tabla 4-6 muestra el procedimiento a seguir.



- Nivel de significancia de los parámetros. La prueba  $t$  permite evaluar la hipótesis nula de que los parámetros sean significativamente igual a cero. Si ese es el caso, al nivel de significación escogido, se preferirá, por parsimonia, prescindir de ella. Si se desea un nivel de significancia del 95%, el valor crítico es 1,96; a su vez, para el 90% tal valor es 1,64.
- Prueba de razón de verosimilitud. Esta prueba permite evaluar dos modelos en el cual uno de ellos es una versión restringida del otro. Si la prueba estadística corrobora la hipótesis nula de que dos modelos son equivalente, se preferirá el modelo más simple, nuevamente por parsimonia. Para un nivel de significancia del 95%, el valor crítico del test chi-cuadrado para un grado de libertad es 3,85, y para dos grados de libertad es 5,99. Para otros grados de libertad puede consultarse en las tablas estadísticas correspondientes.
- Índice  $\rho$  cuadrado. Si bien los resultados de este índice deben ser evaluados cuidadosamente, permiten comparar el ajuste general de dos modelos estimados a partir de la misma muestra. Se preferirá el que tenga mayor índice.

**Tabla 4-6 Análisis para evaluación de variables**

Variable		Significativamente distinta de 0	No significativamente distinta de cero
Relevante o de Política	Signo correcto	OK	Mantener en el modelo
	Signo incorrecto	Problema serio	Problema
Adicional	Signo correcto	OK	Probar si es posible sacarla del modelo
	Signo incorrecto	Sacar del modelo	Sacar del modelo

Fuente: Adaptado de Ortúzar y Willumsen (2001)

#### 4.3.1 Estimación de modelos con datos de Preferencias Reveladas

Dado que se habían tomado información sobre el viaje realizado, se procuró la estimación de modelos con los datos de preferencias reveladas. Las variables consideradas fueron el tiempo de viaje, el tiempo de acceso, el costo y el número de autos.

Sin embargo, los datos de preferencias reveladas presentan varias dificultades, destacando las siguientes:

- El encuestado tiene información clara y razonablemente precisa del modo escogido, no así de los modos alternativos, lo cual genera dificultades en la utilización de la información.
- Los atributos costo y tiempo están altamente correlacionados; esto es, normalmente los modos más rápidos tienen mayores costos.
- Se intentó trabajar con la información disponible de costos y tiempos de viaje entre zonas, encontrándose que no hay información confiable para los costos y tiempos de viaje en los modos privados (auto y taxi).

No obstante el conocimiento de estas dificultades, se estimó el modelo (MNLPR), que se presenta en la Tabla 4-7. El significado de las variables utilizadas para estimar la utilidad sistemática  $V_{iq}$  del modo  $i$  para el individuo  $q$  es el siguiente:

- $T_{iq}$ : Tiempo de viaje del modo  $i$  (min);  $i = 1,2,3$  para los modos Auto, Transporte Público y Taxi, respectivamente.
- $Acc_{iq}$ : Tiempo de acceso del modo  $i$  (min)

- $C_{iq}$ : Costo del modo  $i$  (\$)
- $\delta_i$  = Variable muda que toma el valor de 1 para el modo  $i$ , cero para los restantes modos. Permite especificar variables específicas.
- $No\_Autos_q$ : es el número de autos en el hogar del individuo  $q$ .

Los parámetros a estimar son los siguientes:

- $ASC_i$  es la constante específica del modo  $i$ .
- $\beta_C$  es la utilidad marginal del costo.
- $\beta_T$  es la utilidad marginal del tiempo de viaje.
- $\beta_{TAcc}$  es la utilidad marginal del tiempo de acceso.
- $\beta_{No\_A}$  es la utilidad marginal del número de autos.

**Tabla 4-7 Especificación de modelo con datos de preferencias reveladas**

Modelo	Expresión	$L(\theta)$	Nº Parámetros
MNLPR	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T T_{iq} + \beta_{TAcc} Acc_{iq} + \beta_C C_{iq} + \delta_3 \beta_{No\_A} No\_Autos_q$	-649.7	5

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del modelo pueden observarse en la Tabla 4-8. Del análisis se nota que hay inconsistencia en el signo del tiempo de viaje. Por otra parte, los parámetros del costo y del tiempo de acceso, aunque tienen signos correctos, son poco significativos. Dadas estas razones, no se recomienda el uso del modelo para fines predictivos, por lo cual se decidió no desecharlo, y trabajar con los datos de preferencias declaradas.

**Tabla 4-8 Estimación de modelo con datos de preferencias reveladas**

	<b>Parámetro (modo)</b>	<b>MNLPR</b>
	ASC1	0
	ASC2 (2)	-0,357 (-1,01)
	ASC3 (3)	-1,40 (-4,35)
<b>Coefficientes de atributos</b>	$\beta_T$ (Tiempo) (1,2,3)	0,00893 (1,62)
	$\beta_C$ (Costo) (1,2,3)	-0,0000148 (-0,76)
	$\beta_{TAcc}$ (Tiempo de Acceso) (1,2,3)	-0,0120 (-1,23)
	$\beta_{NO\_A}$ (No Autos - Auto) (1)	1,12 (4,64)
	N° de parámetros	6
	Verosimilitud en Convergencia $l(\theta)$	-636,869
	Test Razón de Verosimilitud (LR)	972,487
	<b><math>\rho^2</math> Ajustado</b>	0,428

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2 Estimación de modelos con datos de Preferencias Declaradas

A continuación se presentan los modelos de PD estimados. En primera instancia se estimaron modelos considerando el SITP como un solo sistema; en este caso se tienen tres alternativas: auto, SITP y taxi (modos 1, 2 y 3, respectivamente). Por otra parte, se estimaron modelos considerando que el SITP cuando se utiliza el metro es un modo diferente del SITP cuando se utilizan únicamente buses (Transmilenio y flexible complementario), caso en el cual se tienen 4 alternativas: auto, SITP-metro, Taxi y SITP-Transmilenio (modos 1, 2, 3 y 4, respectivamente)

#### 4.3.2.1 Modelos considerando el SITP como un único modo

En este esquema de modelación de PD, se definieron las variables de la siguiente manera:

- $V_{iq}$  es la utilidad sistemática de la alternativa  $i$  para el individuo  $q$ .
- $T_{iq}$ : Tiempo de viaje del modo  $i$  (min);  $i = 1,2,3$  para los modos auto, SITP y taxi, respectivamente.
- $Acc_{iq}$ : Tiempo de acceso del modo  $i$  (min)
- $Trans_{2q}$ : Número de transbordos. Aplica únicamente para el modo 2, SITP.
- $C_{iq}$ : Costo del modo  $i$  (\$)
- $Sexo_q$ : Variable que identifica el género del individuo, toma valor 1 para hombre y 0 para mujer. Aplica únicamente para el modo 2, Transporte Público.
- $\delta_i$  = Variable muda que toma el valor de 1 para el modo  $i$ , cero para los restantes modos.
- $Z_{Est\_456q}$ : Variable muda que identifica a los individuos que viven en uno de los estratos 4, 5 o 6; toma valor de 1 en tal caso, y 0 en otro caso. Se asocia con las personas de alto ingreso.
- $O_{Estudq}$ : Variable muda que identifica a los estudiantes, toma el valor de 1 si es un estudiante, cero en otro caso.

A su vez, los parámetros a estimar son los siguientes.

- $ASC_i$  es la constante específica del modo  $i$ . Se ha tomado como referencia el modo 1, auto, para el cual la constante modal específica toma el valor de cero.
- $\beta_C$  es la utilidad marginal del costo
- $\beta_T$  es la utilidad marginal del tiempo de viaje.
- $\beta_{Test-456}$  es la utilidad marginal adicional del tiempo de viaje para los individuos de estrato alto; esto es, que pertenecen a alguno de los estratos 4, 5 o 6.
- $\beta_{TAcc}$  es la utilidad marginal del tiempo de acceso, y aplica para todos los modos.
- $\beta_{TAccEst-456}$  es la utilidad marginal adicional del tiempo de acceso para los individuos de estrato alto; es decir, que pertenecen a alguno de los estratos 4, 5 o 6.
- $\beta_{No_A}$  es la utilidad marginal del número de autos. Aplica únicamente para el modo 1, auto.
- $B_{Sexo}$  Parámetro del sexo, aplica únicamente para el modo 2, SITP.
- $\beta_{Trans}$  es la utilidad marginal del número de transbordos. Este parámetro aplica únicamente para el modo 2, SITP.
- $B_{OEst}$  es el parámetro del atributo estudiante, variable socioeconómica que aplica únicamente para el modo 1, auto.
- $\eta_q$  es un término de error aleatorio, que se ha supuesto sigue la distribución Normal  $(0, \sigma^2)$ , y que se ha añadido al modo 2. Esta componente de error permite correlacionar las observaciones repetidas de un mismo individuo.

Se especificaron modelos Logit Multinomial MNL para toda la muestra, incluyendo variaciones sistemáticas según ingreso y según ocupación. Las formas funcionales de las funciones de utilidad se especifican en la Tabla 4-9. Puede notarse que en cada modelo se agrega una nueva variable explicativa, de tal manera que es aplicable el test razón de verosimilitud. Si se plantea la hipótesis nula de que cada modelo y el siguiente son equivalentes, estimamos la razón de verosimilitud según la ecuación anterior, y se compara con el valor chi-cuadrado con un grado de libertad al 95%; esto es, 3,84. Como en todos los casos este valor crítico es superado, cada modelo presentado es superior al anterior; por tanto, conviene utilizar el modelo más complejo, pero en la práctica ello también dependerá de la información disponible. Adicionalmente durante el proceso se estimaron modelos de componentes de error tipo Logit Mixto ML, considerando la existencia de correlación entre las observaciones del mismo individuo.

**Tabla 4-9 Especificación de modelos Logit Multinomial MNL y Logit Mixto (3 modos)**

Modelo	Expresión
MNL1_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} Acc_{iq} + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q}$
MNL11_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q}$
MNL13_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q} + \beta_{Sexo} Sexo_q$
MNLVS1_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q}$
MNLVS2_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q} + \beta_{Sexo} Sexo_q$
MNLVS3_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \beta_{OEstud} O_{Estudq} + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q} + \beta_{Sexo} Sexo_q$
MNLVS4_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q}$
ML1_M	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_2 \beta_{Trans} Trans_{2q} + \beta_{Sexo} Sexo_q + \eta_q$

Fuente: Elaboración propia

Los modelos calibrados se presentan en la Tabla 4-10. En todos los casos se aprecia que los signos son consistentes y los parámetros son en su mayor parte significativos al 90%.

Es importante aclarar que estos modelos fueron estimados con una muestra de 10125 pseudo - individuos.

Tabla 4-10 Modelos estimados (3 modos)

	Parámetro	MNL1_M	MNL11_M	MNL13_M	MNLVS1_M	MNLVS2_M	MNLVS3_M	MNLVS4_M	ML1_M
	ASC1	0	0	0	0	0	0	0	0
	ASC2	-0,709 (-11,83)	-0,153 (-1,88)	-0,364 (-4,24)	-0,133 (-1,62)	-0,346 (-4,02)	-0,385 (-4,42)	-0,709 (-11,82)	-0,334 (-1,62)
	ASC3	-0,241 (-4,36)	0,313 (3,98)	0,298 (3,77)	0,338 (4,25)	0,324 (4,07)	0,285 (3,54)	-0,240 (-4,34)	0,210 (0,55)
Coeficientes de atributos	$\beta_T$ (Tiempo) (1,2,3)	-0,0344 (-13,49)	-0,0344 (-13,42)	-0,0347 (-13,49)	-0,0265 (-7,73)	-0,0268 (-7,77)	-0,0267 (-7,76)	-0,0281 (-8,22)	-0,0489 (-8,31)
	$\beta_C$ (Costo) (1,2,3)	-0,000257 (-14,79)	-0,000257 (-14,73)	-0,000261 (-14,90)	-0,000258 (-14,78)	-0,000262 (-14,97)	-0,000262 (-14,96)	-0,000257 (-14,81)	-0,000413 (-13,20)
	$\beta_{TACC}$ (Tiempo Acceso) (1,2,3)	-0,0418 (-9,48)	-0,0419 (-9,46)	-0,0424 (-9,53)	-0,0356 (-5,81)	-0,0371 (-6,04)	-0,0377 (-6,13)	-0,0324 (-5,33)	-0,0601 (-6,09)
	$\beta_{TRANS}$ (Transbordo-SITP) (2)	-0,296 (-8,14)	-0,298 (-8,17)	-0,301 (-8,22)	-0,298 (-8,17)	-0,301 (-8,22)	-0,302 (-8,24)	-0,296 (-8,15)	-0,642 (-11,56)
	$\beta_{NO\_A}$ (No Autos - Auto) (1)		0,362 (9,95)	0,376 (10,28)	0,377 (10,19)	0,393 (10,56)	0,398 (10,69)		0,789 (4,11)
	$\beta_{SEX}$ (Sexo - SITP) (2)			0,357 (8,41)		0,363 (8,52)	0,363 (8,53)		0,780 (3,55)
	$\beta_{Ocup\_est}$ (Estudiante - A) (1)						-0,165 (-3,08)		
	$\beta_{T\_E456}$ (Estratos 456) (1,2,3)				-0,0128 (-3,41)	-0,0130 (-3,46)	-0,0131 (-3,50)	-0,0100 (-2,69)	-0,0182 (-2,80)
	$\beta_{TACC\_E456}$ (Estratos 456) (1,2,3)				-0,0100 (-1,48)	-0,00844 (-1,24)	-0,00751 (-1,10)	-0,0148 (-2,21)	-0,0252 (-2,13)
	$\sigma$								3,26 (25,71)
N° de parámetros	6	7	8	9	10	11	8	11	
Logverosimilitud L( $\theta$ )	-6685,4	-6653,3	-6599,1	-6628,6	-6592,1	-6587,3	-6681,64	-4557,3	
Test Razón de Verosimilitud LR	665,448	766,266	838,113	779,005	852,071	861,551	672,958	4921,5	
$\rho^2$ Ajustado	0,047	0,052	0,060	0,055	0,061	0,061	0,047	0,349	

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior, existe un cambio en el signo de la constante ASC3 (taxi) en los modelos MNL1\_M y MNLVS4\_M. Para hacer claridad sobre este hecho, debe recordarse que la población objetivo de la encuesta está constituida por usuarios de autos, pudiendo notarse que los modelos referidos no involucran la variable número de autos, altamente significativa en la utilidad del modo auto (siendo positiva para ese modo) en los modelos que si lo incluyen. Por tanto, cuando se excluye esta variable, la constante modal "recoge" el efecto de ella por su no inclusión. De esta manera, dado que la constante de referencia fijada en ceros, es la del auto, las constantes modales de los restantes modos (TM y Metro) tienden a recoger la percepción "más" negativa de estos modos respecto de aquel.

Esto puede verificarse de una manera muy simple: considerando que el número promedio de autos en la población como 1.4 y reemplazarlo en el modelo MNL11M (segundo de la tabla), que es muy parecido al MNL1\_M (primero en la tabla), excepto por el hecho que a diferencia de éste si incluye el atributo número de auto, el ajuste que habría que hacer es

$$1.4 * 0.362 = 0.51$$

valor que si se resta a la constante modal ASC3 del segundo modelo resulta

$$0,313 - 0.51 = -0.19$$

bastante parecido al del modelo  $MNL1\_M = -0.24$ ; de igual manera si se hace un ejercicio similar para la constante  $ASC2$ , al restar se tiene

$$-0.153 - 0.51 = -0.66, \text{ muy cercano al valor } -0.709 \text{ del modelo } MNL1\_M$$

Considérese, por otra parte, que el menor valor que toma la variable número de autos es 1 (dado que por definición la población objetivo es personas con acceso al vehículo). En este caso, al reemplazarlos en el modelo  $MNL11\_M$ , la corrección es

$$1 * 0.362 = 0.362,$$

valor que si se resta a la constante modal  $ASC3$  del segundo modelo, resulta en un valor negativo como se demuestra:

$$0,313 - 0.362 = -0.049$$

Es necesario precisar que no es raro la ocurrencia de cambios de signo en las constantes modales dependiendo de la especificación de la función de utilidad. En últimas, el signo de las constantes dependerá de las restantes variables incluidas en el modelo y de la forma como ha sido especificado.

Adicionalmente, la Tabla 4-11 presenta para cada modelo el valor de las diferentes tasas marginales de sustitución entre cada atributo y el costo, que se asocia como la disposición a pagar por una mejora marginal en el valor del atributo considerado. Las tasas calculadas con el valor subjetivo del tiempo de viaje ( $VSTV$ ), el valor subjetivo del tiempo de acceso ( $VSTAcc$ ); estas dos, además, se evaluaron para segmentos de la población con distinto ingreso; uno para los estratos de más bajo ingreso, 2 y 3, y otro para los estratos 4, 5 y 6, con mayor poder adquisitivo. Es relevante aclarar que el análisis ha sido realizado para poseedores de auto, razón por la cual los valores obtenidos deberán ser más altos que los de la población que no tiene vehículo, menos solvente. Otra tasa marginal estimada se relaciona con los transbordos, que puede interpretarse como la penalidad en términos económicos de un transbordo o como la disposición a pagar para no realizarlo.

**Tabla 4-11 Cálculo de tasas marginales de sustitución. Modelos con 3 modos**

Modelo	MNL1_ M	MNL11_ M	MNL13_ M	MNLVS 1_M	MNLVS 2_M	MNLVS 3_M	MNLVS 4_M	ML1_M
<b>VSTV (\$/min)</b>	<b>134</b>	<b>134</b>	<b>133</b>					
<b>VSTAcc (\$/min)</b>	<b>163</b>	<b>163</b>	<b>162</b>					
<b>VSTV Estratos 23 (\$/min)</b>				<b>102</b>	<b>102</b>	<b>102</b>	<b>109</b>	<b>118</b>
VSTAcc Estratos 23 (\$/min)				138	141	144	148	146
VST Estratos 456 (\$/min)				152	152	152	126	162
VSTAcc Estratos 456 (\$/min)				177	174	173	183	207
Transbordos (\$/Transbordo)	1152	1152	1153	1155	1149	1153	1152	1554

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se realiza un análisis de cada uno de los modelos obtenidos:

- **MNL1\_M.** Es un modelo básico que contiene estrictamente los atributos de las alternativas tomadas en la encuesta. Puede notarse que es robusto, dado que todos los parámetros son significativos al 95%. La estimación del valor del tiempo de viaje es de \$134/min, mientras que para el tiempo de acceso es \$163/min, mayor como era de esperar. Por otra parte, el transbordo se penaliza en \$1152, valor alto y que denota poca disposición para aceptar el transbordo en la población estudiada.
- **MNL11\_M.** Es muy similar al modelo anterior, adicionando la variable número de autos, con lo cual mejora el poder predictivo. Las tasas marginales de sustitución obtenidas son idénticas a las del modelo MNL1\_M.
- **MNL13\_M.** En este modelo se incorpora, además del número de autos, el género, que ha sido especificado para el transporte público y que mejora de manera importante la bondad de ajuste. El hecho de ser esta variable significativa y positiva indica una mayor disposición de los hombres a tomar el transporte público. Los valores del tiempo de viaje (\$133/min), del tiempo de acceso (162/min) y la disposición a pagar por los transbordos (\$1153/min) son muy similares a los de los modelos anteriores
- **MNLVS1\_M.** Es un modelo Logit Multinomial, pero que considera variaciones sistemáticas en el tiempo de viaje y el tiempo de acceso según ingreso. Sobre este caso, resulta de interés aclarar que se evaluaron distintas agrupaciones según el estrato socioeconómico, y se encontró un comportamiento homogéneo en dos niveles: estratos 2 y 3, y en los estratos 4,5 y 6. Al respecto, debe mencionarse que dado que la encuesta fue aplicada a poseedores de auto se trata, aunque vivan en un sector de estrato relativamente bajo, de personas con ingreso superior al promedio. Puede notarse que incorporar tales variaciones sistemáticas mejora el poder predictivo del modelo; los signos del modelo son los esperados aunque el parámetro de utilidad marginal adicional del tiempo de acceso no es significativo al 90%. En este caso, se tienen valores de las tasas marginales de sustitución diferenciales, siendo en el caso del valor del tiempo \$102/min para los estratos 2 y 3, y \$152/min para los estratos 4, 5 y 6. A su vez, el valor del tiempo de acceso para los estratos 2 y 3 resultó ser \$138/min y \$177/min para los estratos 4,5 y 6. La penalidad por cada transbordo es de \$1155.
- **MNLVS2\_M.** Al igual que el modelo anterior incorpora variaciones sistemáticas según ingreso y género, lo que mejora la bondad de ajuste. Aunque nuevamente los signos del modelo son los esperados, el parámetro de utilidad marginal adicional del tiempo de acceso no es significativo al 90%. Los valores de las tasas marginales de sustitución diferenciales según ingreso son en el caso del valor del tiempo \$102/min para los estratos 2 y 3, y \$152/min para los estratos 4, 5 y 6. A su vez, el valor del tiempo de acceso para los estratos 2 y 3 resultó ser \$141/min y \$174/min para los estratos 4,5 y 6. La penalidad por cada transbordo es de \$1149
- **MNLVS3\_M.** Es el modelo tipo Logit Multinomial más completo. Incluye variaciones sistemáticas según ingreso y las variables género, y ocupación estudiante, esta última en el modo auto y que al ser negativa indica una menor disposición de los estudiantes hacia el uso del vehículo privado, lo que en gran medida se relaciona con la competencia por el vehículo al interior del hogar. El valor del tiempo de viaje es \$102/min para los estratos 2 y 3, y \$152/min para los estratos 4, 5 y 6; por su parte, los valores análogos respectivos para el valor del tiempo de acceso son \$144/min y \$173/min. Cada transbordo se penaliza en \$1153.
- **MNLVS4\_M.** Este modelo incluye variaciones sistemáticas según ingreso para los estratos 4, 5 y 6. El valor del tiempo de viaje es \$109/min para los estratos 2 y 3, y \$148/min para



los estratos 4, 5 y 6; por su parte, los valores análogos respectivos para el valor del tiempo de acceso son \$126/min y \$183/min. Cada transbordo se penaliza en \$1152.

- **ML1\_M.** Este modelo considera, además de variaciones sistemáticas, una componente de error que correlaciona las observaciones repetidas de un individuo; es decir, correlación serial (Cantillo et al, 2007). Puede notarse la notable mejora en el ajuste del modelo y que los parámetros estimados son mayores que los de los presentados anteriormente, lo cual indica que hay una reducción sustancial en la varianza del error aleatorio. Según este modelo, el valor del tiempo de viaje es de unos \$120/min para los estratos 2 y 3, y cerca de \$160/min para los estratos 4, 5 y 6; entretanto, para el tiempo de accesos se tienen valores aproximados a \$145/min para los estratos de menos ingresos y a \$205/min para los de alto ingreso. Por su parte, cada transbordo se penaliza en unos \$1550. En general, los valores aquí obtenidos son más altos que los estimados en los modelos anteriores.

Otro ejercicio realizado, dada la riqueza y cantidad de la información disponible, consistió en estimar modelos estratificados, segmentando la población. Tales modelos son presentados en la Tabla 4-12. Adicionalmente, en la Tabla 4-13 se muestran los valores de las tasas marginales de sustitución. La descripción de cada modelo se realiza a continuación.

- **MNLEB\_M.** Es un modelo estimado para estudiantes de estratos 2 y 3. Incluye los atributos básicos de las alternativas: costo, tiempo de viaje, tiempo de acceso, número de transbordos. Además, el número de autos y el género.
- **MNLEA\_M.** Modelo estimado para los estudiantes de estratos 4,5 y 6.
- **MNLTB\_M.** Modelo para personas que trabajan (incluye empleados, independientes y otras ocupaciones), pertenecientes a los estratos 2 y 3.
- **MNLTA\_M.** Modelo estimado para personas que trabajan pertenecientes a los estratos 4 y 5.

En estos casos puede notarse que la disposición a pagar de los estudiantes es menor que la de quienes trabajan, lo cual se refleja principalmente en la penalidad por el transbordo.

**Tabla 4-12 Modelos estratificados considerando tres modos**

	Parámetro	MNLEB_M	MNLEA_M	MNLTB_M	MNLTA_M
	ASC1	0	0	0	0
	ASC2	-0,243 (-0,98)	-1,18 (-5,40)	-0,773 (-4,33)	-0,364 (-4,24)
	ASC3	0,840 (3,35)	-0,195 (-0,90)	0,159 (1,03)	0,298 (3,77)
Coeficientes de atributos	$\beta_T$ (Tiempo) (1,2,3)	-0,0205 (-2,66)	-0,0529 (-7,46)	-0,0349 (-7,21)	-0,0347 (-13,49)
	$\beta_C$ (Costo) (1,2,3)	-0,000314 (-5,75)	-0,000420 (-8,47)	-0,000249 (-7,71)	-0,000261 (-14,90)
	$\beta_{TACC}$ (Tiempo de Acceso) (1,2,3)	-0,0321 (-2,39)	-0,0701 (-5,69)	-0,0363 (-4,34)	-0,0424 (-9,53)
	$\beta_{TRANS}$ (Transbordo – SITP) (2)	-0,224 (-2,11)	-0,310 (-3,02)	-0,332 (-4,99)	-0,301 (-8,22)
	$\beta_{NO\_A}$ (No Autos - Auto) (1)	0,154 (1,45)	0,109 (1,26)	0,275 (3,10)	0,376 (10,28)
	$\beta_{SEX}$ (Sexo - SITP) (2)	0,00151 (0,01)	-0,0274 (-0,23)	0,533 (6,24)	0,357 (8,41)
	Nº de parámetros	8	8	8	8
No Observaciones	1080	1485	2763	4797	
Logverosimilitud $L(\theta)$	-708,844	-927.975	-1822,499	-3063.602	
Test Razón de Verosimilitud LR	79,509	202.698	185,334	522.851	
$\rho^2$ Ajustado	0,042	0,091	0,044	0,076	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-13 Tasas marginales de sustitución de modelos estratificados considerando 3 modos**

Modelo	MNLEB_M	MNLEA_M	MNLTB_M	MNLTA_M
VSTV (\$/min)	65	126	140	133
VSTAcc (\$/min)	102	167	146	162
Transbordos (\$/Transbordo)	713	738	1333	1153

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2.2 Modelos considerando SITP-Metro y SITP-Transmilenio como alternativas

Para este esquema de modelación, en el cual se diferencia el SITP cuando el eje troncal es el metro de cuando éste es un vehículo tipo bus (Transmilenio), se definieron las variables de la siguiente manera:

- $V_{iq}$  es la utilidad sistemática de la alternativa  $i$  para el individuo  $q$ .
- $T_{iq}$ : Tiempo de viaje del modo  $i$  (min);  $i = 1,2,3,4$  para los modos auto, SITP-metro, taxi y SITP-Transmilenio, respectivamente.
- $Acc_{iq}$ : Tiempo de acceso del modo  $i$  (min)
- $Trans_{2,4q}$ : Número de transbordos. Aplica únicamente para los modos 2 y 4, SITP-Metro y SITP-Transmilenio.

- $C_{iq}$ : Costo del modo  $i$  (\$)
- $Sexo_q$ : Variable que identifica el género del individuo, toma valor 1 para hombre y 0 para mujer. Aplica únicamente para los modos 2 y 4, SITP-metro y SITP-Transmilenio.
- $\delta_i$  = Variable muda que toma el valor de 1 para el modo  $i$ , cero para los restantes modos.
- $Z_{Est\_456q}$ : Variable muda que identifica a los individuos que viven en uno de los estratos 4, 5 o 6; toma valor de 1 en tal caso, y 0 en otro caso. Se asocia con las personas de alto ingreso.
- $O_{Estudq}$  Variable muda que identifica a los estudiantes, toma el valor de 1 si es un estudiante, cero en otro caso.

A su vez, los parámetros a estimar son los siguientes.

- $ASC_i$  es la constante específica del modo  $i$ . Se ha tomado como referencia el modo 1, auto, para el cual la constante modal específica toma el valor de cero.
- $\beta_C$  es la utilidad marginal del costo
- $\beta_T$  es la utilidad marginal del tiempo de viaje
- $\beta_{T_{Est-456}}$  es la utilidad marginal adicional del tiempo de viaje para los individuos de estrato alto; esto es, que pertenecen a alguno de los estratos 4, 5 o 6.
- $\beta_{T_{Acc}}$  es la utilidad marginal del tiempo de acceso
- $\beta_{T_{AccEst-456}}$  es la utilidad marginal adicional del tiempo de acceso para los individuos de estrato alto; es decir, que pertenecen a alguno de los estratos 4, 5 o 6.
- $\beta_{No\_A}$  es la utilidad marginal del número de autos. Aplica únicamente para el modo 1, auto.
- $B_{Sexo}$  Parámetro del sexo, aplica únicamente para los modos 2 y 4, SITP-metro y SITP-Transmilenio.
- $\beta_{Trans}$  es la utilidad marginal del número de transbordos. Aplica únicamente para los modos 2 y 4, SITP-metro y SITP-Transmilenio.
- $B_{OEst}$  es el parámetro del atributo estudiante. Aplica únicamente para el modo 1, auto.
- $\eta_q$  es un término de error aleatorio, que distribuye Normal  $(0, \sigma^2)$ , y que se ha añadido los modos 2 y 4. Esta componente de error permite correlacionar las observaciones repetidas de un mismo individuo.

Se especificaron modelos análogos a los presentados anteriormente, con las funciones de utilidad según se presenta en la tabla siguiente.

**Tabla 4-14 Especificación de modelos Logit Multinomial MNL y Logit Mixto (4 modos)**

Modelo	Expresión
MNL1_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} Acc_{iq} + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q}$
MNL11_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q}$
MNL13_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q} + \beta_{Sexo} Sexo_q$
MNLVS1_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q}$
MNLVS2_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q} + \beta_{Sexo} Sexo_q$
MNLVS3_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \beta_{OEstud} O_{Estudq} + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q} + \beta_{Sexo} Sexo_q$
MNLVS4_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q}$
ML1_T	$V_{iq} = ASC_i + \beta_T + \beta_{TEst\_456} Z_{Est\_456q} T_{iq} + \beta_C C_{iq} + \beta_{TAcc} + \beta_{TAcceEst\_456} Z_{Est\_456q} Acc_{iq} + \delta_1 \beta_{No\_A} No\_A_q + \delta_{2,4} \beta_{Trans} Trans_{2,4q} + \beta_{Sexo} Sexo_q + \eta_q$

Fuente: Elaboración propia

Los modelos calibrados se presentan en la Tabla 4-15. Nótese que en todos los casos los signos son consistentes y los parámetros son en su mayor parte significativos al 90%. Adicionalmente, en la Tabla 4-16 se presentan las correspondientes tasas marginales de sustitución.

Tabla 4-15 Modelos estimados (4 modos)

	Parámetro	MNL1_T	MNL11_T	MNL13_T	MNLVS1_T	MNLVS2_T	MNLVS3_T	MNLVS4_T	ML1_T
	ASC1	0	0	0	0	0	0	0	0
	ASC2	-0,713 (-11,79)	-0,135 (-1,64)	-0,346 (-4,00)	-0,113 (-1,36)	-0,324 (-3,73)	-0,346 (-3,93)	-0,713 (-11,79)	-0,256 (-0,72)
	ASC3	-0,252 (-4,55)	0,322 (4,06)	0,304 (3,82)	0,349 (4,37)	0,334 (4,16)	0,313 (3,86)	-0,251 (-4,53)	0,274 (0,70)
	ASC4	-0,817 (8,85)	-0,247 (-2,29)	-0,484 (-4,32)	-0,226 (-2,09)	-0,463 (-4,13)	-0,472 (-4,20)	-0,816 (-8,83)	-0,711 (-1,35)
Coeficientes de atributos	$\beta_T$ (Tiempo) (1,2,3,4)	-0,0344 (-13,43)	-0,0344 (-13,37)	-0,0347 (-13,45)	-0,0263 (-7,62)	-0,0266 (-7,68)	-0,0266 (-7,68)	-0,0279 (-8,13)	-0,0490 (-8,44)
	$\beta_C$ (Costo) (1,2,3,4)	-0,000255 (-14,66)	-0,000256 (-14,59)	-0,000260 (-14,77)	-0,000257 (-14,65)	-0,000261 (-14,83)	-0,000261 (-14,83)	-0,000256 (-14,68)	-0,000413 (-13,02)
	$\beta_{TACC}$ (Tiempo de Acceso) (1,2,3,4)	-0,0418 (-9,46)	-0,0420 (-9,44)	-0,0425 (-9,52)	-0,0360 (-5,85)	-0,0375 (-6,07)	-0,0378 (-6,11)	-0,0326 (-5,33)	-0,0598 (-6,00)
	$\beta_{TRANS}$ (Transbordo - TP) (2,4)	-0,299 (-8,19)	-0,302 (-8,23)	-0,305 (-8,28)	-0,302 (-8,23)	-0,305 (-8,28)	-0,305 (-8,29)	-0,305 (-8,29)	-0,659 (-11,73)
	$\beta_{NO\_A}$ (No Autos - Auto) (1)		0,376 (10,21)	0,388 (10,50)	0,393 (10,49)	0,407 (10,83)	0,410 (10,89)		0,880 (4,46)
	$\beta_{SEX}$ (Sexo - TP) (2,4)			0,356 (8,34)		0,359 (8,41)	0,360 (8,41)		0,792 (3,51)
	$\beta_{ocup\_est}$ (Estudiante - A) (1)						-0,0908 (-1,66)		
	$\beta_{T\_E456}$ (Estratos 456) (1,2,3,4)				-0,0132 (-3,50)	-0,0134 (-3,54)	-0,0134 (-3,56)	-0,0103 (-2,76)	-0,0206 (-2,80)
	$\beta_{TACC\_E456}$ (Estratos 456) (1,2,3,4)				-0,00955 (-1,40)	-0,00808 (-1,18)	-0,00760 (-1,11)	-0,0147 (-2,17)	-0,0278 (-2,33)
	$\sigma$								3,33 (25,46)
Nº de parámetros	7	8	9	10	11	12	9	12	
Logverosimilitud L( $\theta$ )	-6628,9	-6575,7	-6540,7	-6568,8	-6533,2	-6531,9	-6625,1	-4479,7	
Test Razón de Verosimilitud LR	650,766	775,238	827,227	771,056	842,197	844,961	658,547	4949,325	
$\rho^2$ Ajustado	0,046	0,053	0,058	0,054	0,059	0,059	0,046	0,354	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-16 Cálculo de tasas marginales de sustitución. Modelos con 4 modos

Modelo	MNL1_T	MNL11_T	MNL13_T	MNLVS1_T	MNLVS2_T	MNLVS3_T	MNLVS4_T	ML1_T
VSTV (\$/min)	134	134	133					
VSTAcc (\$/min)	163	163	164					
VSTV Estratos 23 (\$/min)				102	102	102	109	118
VSTAcc Estratos 23 (\$/min)				140	143	145	127	146
VST Estratos 456 (\$/min)				154	153	153	149	162
VSTAcc Estratos 456 (\$/min)				177	174	173	185	207
Transbordos (\$/Transbordo)	1172	1179	1173	1175	1169	1168	1168	1554

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, al comparar estos modelos con aquellos en los que se agrupaban los modos de transporte público, puede notarse que hay mejoras en los test de bondad de ajuste. Por otra parte, la constante modal del modo SITP-Transmilenio al ser comparada con la SITP-Metro denota una mayor

penalización; esto es, hay preferencia hacia el metro respecto del bus. Seguidamente se realiza un análisis de cada uno de los nuevos modelos obtenidos:

- **MNL1\_T.** Es un modelo robusto donde todos los parámetros son significativos al 95%. La estimación del valor del tiempo de viaje es de \$134/min, mientras que para el tiempo de acceso es \$163/min. El transbordo se penaliza en \$1172.
- **MNL11\_T.** Al agregar al modelo anterior la variable número de autos mejora el poder predictivo. Las tasas marginales de sustitución obtenidas son parecidas a las del modelo anterior.
- **MNL13\_T.** En este modelo se incorpora, además del número de autos, el género, que ha sido especificado para los modos 2 y 4 mejorando de manera importante la bondad de ajuste. Los valores del tiempo de viaje (\$133/min), del tiempo de acceso (164/min) y la disposición a pagar por los transbordos (\$1173/min) son muy similares a los de los modelos anteriores
- **MNLVS1\_T.** Es un modelo Logit Multinomial, con similares características al MNLVS1\_M, incorporando el estrato. En este caso, se tienen valores de las tasas marginales de sustitución según estrato, siendo en el caso del valor del tiempo \$102/min para los estratos 2 y 3, y \$154/min para los estratos 4, 5 y 6. Por otra parte, el valor del tiempo de acceso para los estratos 2 y 3 resultó ser \$140/min y \$177/min el de los estratos 4,5 y 6. La penalidad por cada transbordo es de \$1175.
- **MNLVS2\_T.** Incorpora variaciones sistemáticas según ingreso y además la variable género, lo que mejora la bondad de ajuste. Los valores de las tasas marginales de sustitución son en el caso del valor del tiempo de viaje \$102/min para los estratos 2 y 3, y \$154/min para los estratos 4, 5 y 6. A su vez, el valor del tiempo de acceso para los estratos 2 y 3 resultó ser \$141/min y \$177/min para los estratos 4,5 y 6. La penalidad por cada transbordo es de \$1169
- **MNLVS3\_T.** Incluye variaciones sistemáticas según ingreso y las variables género, y ocupación estudiante, esta última en el modo auto. El valor del tiempo de viaje es \$102/min para los estratos 2 y 3, y \$153/min para los estratos 4, 5 y 6; por su parte, los valores análogos respectivos para el valor del tiempo de acceso son \$145/min y \$173/min. Cada transbordo se penaliza en \$1168.
- **MNLVS4\_T.** Incorpora variaciones sistemáticas según ingreso. Los valores de las tasas marginales de sustitución son en el caso del valor del tiempo de viaje \$102/min para los estratos 2 y 3, y \$149/min para los estratos 4, 5 y 6. A su vez, el valor del tiempo de acceso para los estratos 2 y 3 resultó ser \$127/min y \$185/min para los estratos 4,5 y 6. La penalidad por cada transbordo es de \$1168.
- **ML1\_T.** Este modelo considera, además de variaciones sistemáticas, una componente de error que correlaciona las observaciones repetidas de un individuo, mejorando notablemente el ajuste del modelo. Según este modelo, el valor del tiempo de viaje se aproxima a \$118/min para los estratos 2 y 3, y a \$162/min para los estratos 4, 5 y 6. Por su parte, para el tiempo de accesos se tienen valores aproximados a \$146/min para los estratos de menos ingresos y a \$207/min para los de mayor ingreso. Cada transbordo se penaliza en unos \$1554. En general, los valores aquí obtenidos son más altos que los estimados en los modelos anteriores.

Al igual que en el caso anterior, se estimaron modelos estratificados, segmentando la población siguiendo los criterios de ingreso (según estrato) y ocupación (estudiantes y trabajadores). Tales modelos son presentados en la Tabla 4-17.

En la Tabla 4-18 pueden consultarse los valores de las tasas marginales de sustitución. La descripción de cada modelo se realiza a continuación.

- **MNLEB\_T.** Modelo estimado para estudiantes de estratos 2 y 3. Incluye los atributos básicos de las alternativas: costo, tiempo de viaje, tiempo de acceso, número de transbordos. Además, el número de autos y el género.
- **MNLEA\_T.** Modelo estimado para los estudiantes de estratos 4,5 y 6.
- **MNLTB\_T.** Modelo para personas que trabajan (incluye empleados, independientes y otras ocupaciones), pertenecientes a los estratos 2 y 3.
- **MNLTA\_T.** Modelo estimado para personas que trabajan pertenecientes a los estratos 4 y 5.

En estos casos puede notarse que la disposición a pagar de los estudiantes es menor que la de quienes trabajan, lo cual se refleja principalmente en la penalidad por el transbordo.

**Tabla 4-17 Modelos estratificados considerando cuatro modos**

	Parámetro	MNLEB_T	MNLEA_T	MNLTB_T	MNLTA_T
	ASC1	0	0	0	0
	ASC2	-0,163 (-0,63)	-1,20 (-5,27)	-0,771 (-4,32)	-0,00231 (-0,02)
	ASC3	0,715 (2,69)	-0,369 (-1,61)	0,158 (1,03)	0,389 (3,19)
	ASC4	-12,4 (-0,19)	-14,2 (-0,18)	-0,816 (-3,62)	0,136 (0,87)
Coeficientes de atributos	$\beta_T$ (Tiempo) (1,2,3,4)	-0,0191 (-2,40)	-0,0555 (-7,51)	-0,0349 (-7,21)	-0,0347 (-9,09)
	$\beta_C$ (Costo) (1,2,3,4)	-0,000303 (-5,34)	-0,000417 (-8,10)	-0,000249 (-7,72)	-0,000230 (-8,82)
	$\beta_{TACC}$ (Tiempo de Acceso) 1,2,3,	-0,0305 (-2,19)	-0,0736 (-5,75)	-0,0364 (-4,43)	-0,0427 (-6,48)
	$\beta_{TRANS}$ (Transbordo – Transporte Público) (2,4)	-0,247 (-2,25)	-0,332 (-3,12)	-0,332 (-4,99)	-0,315 (-5,68)
	$\beta_{NO\_A}$ (No Autos - Auto) (1)	0,191 (1,67)	0,0852 (0,95)	0,257 (3,10)	0,547 (9,94)
	$\beta_{SEX}$ (Sexo - TP) (2,4)	0,00273 (0,20)	-0,0962 (-0,80)	0,535 (6,24)	0,415 (6,71)
	N° de parámetros	9	9	9	9
	No Observaciones	1080	1485	2763	4797
	Logverosimilitud $L(\theta)$	-661,5	-863.519	-1822,499	-3062.658
	Test Razón de Verosimilitud LR	118,758	259.522	185,434	524.738
	$\rho^2$ Ajustado	0,070	0,122	0,044	0,076

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-18 Tasas marginales de sustitución de modelos estratificados considerando 4 modos**

Modelo	MNLEB_T	MNLEA_T	MNLTB_T	MNLTA_T
VSTV (\$/min)	63	133	140	151
VSTAcc (\$/min)	101	176	146	187
Transbordos (\$/Transbordo)	815	796	1333	1370

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.3 Utilización de los modelos en modalidad predictiva

La planificación de encuestas de preferencias declaradas ha permitido estimar modelos de elección discreta caracterizados por su robustez estadística y consistencia microeconómica. Los datos de preferencias reveladas, dadas las incongruencias en los datos y la correlación entre las variables no permitieron estimar buenos modelos.

Se han calibrado una serie de modelos que pueden ser utilizados en modalidad predictiva, unos más complejos que otros. La escogencia de alguno de ellos depende de la calidad de la información disponible.

Tomando como referencia la constante modal del auto, las obtenidas para los modos de transporte público son negativas, lo cual, *ceteris paribus*, refleja una mejor percepción y disposición a utilizar el auto



privado. La constante modal del taxi es también negativa, pero menos influyente que la del transporte público. Puede notarse, además, que es mayor la penalidad para el SITP cuando se utiliza Transmilenio que cuando se utiliza el metro.

De los modelos Logit Multinomial se deriva que los valores del tiempo de viaje difieren según ingreso, siendo del orden de \$150/min para los estratos 4, 5 y 6, y \$100/min para los estratos 2 y 3. El tiempo de acceso es penalizado más fuertemente y tiene un valor del orden de \$175/min para los estratos 4, 5 y 6, y \$140/min para los estratos 2 y 3. Es notable, por otra parte, la alta penalización a cada transbordo, siendo esta cercana a \$1150.

Los modelos tipo Logit Mixto o Logit de Componentes de Error estimados presentan mucho mejor ajuste que los Logit Multinomial. Sin embargo, su utilización requiere un esfuerzo computacional mucho mayor, por lo que se evalúa la conveniencia de su aplicación. Los resultados de los modelos ML muestran valoraciones para el tiempo de viaje y el transbordo superiores a los obtenidos con los modelos MNL.

Las consideraciones anteriores han regido la selección del modelo designado como MNLVS4\_M. que incluye variaciones sistemáticas según ingreso para los estratos 4, 5 y 6. El valor del tiempo de viaje es \$109/min para los estratos 2 y 3, y \$148/min para los estratos 4, 5 y 6; por su parte, los valores análogos respectivos para el valor del tiempo de acceso son \$126/min y \$183/min. Cada transbordo se penaliza en \$1152.

Conocidos los atributos de cada uno de los modos considerados; esto es: Sistema Integrado de Transporte Público (SITP-metro y SITP-Transmilenio), el auto privado y el taxi, se procede a calcular las utilidades sistemáticas correspondientes y utilizando la fórmula Logit estimar la probabilidad de elección de cada uno de ellos. Esta aplicación se realiza para el segmento de la población que tiene acceso al vehículo particular. Es evidente que los valores de los atributos corresponden a los resultantes en cada uno de los escenarios evaluados, por lo cual la proporción de viajes en cada alternativa es sensible a la oferta.

El proceso seguido se detalla a continuación:

1. Definir el escenario de la oferta, estimar la generación de viajes y la matriz de distribución.
2. Se ha considerado que los no poseedores de auto utilizan el sistema de transporte público, luego los modelos de elección modal se aplican entre quienes tienen acceso al auto.
3. En el caso de los poseedores de auto, en cada par origen destino de la ciudad, se definen para cada segmento de la población los valores medios de los atributos, procediendo al cálculo de las utilidades y las probabilidades de elección. Los viajes de ese segmento de la población se reparten según las probabilidades halladas entre los modos alternativos. Los atributos a considerar son el tiempo de viaje, los tiempos de acceso, los costos y el número de transbordo, que resultan de una asignación inicial, incorporando además variables socioeconómicas como el estrato y la tasa de motorización.
4. Las matrices modales que se obtienen son asignadas, lo cual da origen a nuevos valores de nivel de servicio (costos y tiempos de viaje y acceso). A fin de garantizar consistencias entre los valores utilizados en las distintas etapas del modelo puede seguirse un proceso iterativo o utilizar un algoritmo de equilibrio simultáneo (De Cea et al, 2005).

## 5 MODELO DE PIVOTE DE LAS MATRICES BASE 2008

El proceso seguido se detalla a continuación:

1. Definir el escenario de la oferta, estimar la generación de viajes y la matriz de distribución.
2. Se ha considerado que los no poseedores de auto utilizan el sistema de transporte público, luego los modelos de elección modal se aplican entre quienes tienen acceso al auto.
3. En el caso de los poseedores de auto, en cada par origen destino de la ciudad, se definen para cada segmento de la población los valores medios de los atributos, procediendo al cálculo de las utilidades y las probabilidades de elección. Los viajes de ese segmento de la población se reparten según las probabilidades halladas entre los modos alternativos. Los atributos a considerar son el tiempo de viaje, los tiempos de acceso, los costos y el número de transbordo, que resultan de una asignación inicial, incorporando además variables socioeconómicas como el estrato y la tasa de motorización. Citar, en este punto, que se ha considerado igualmente la medida de Pico y Placa.
4. Las matrices modales que se obtienen son asignadas, lo cual da origen a nuevos valores de nivel de servicio (costos y tiempos de viaje y acceso). A fin de garantizar consistencias entre los valores utilizados en las distintas etapas del modelo puede seguirse un proceso iterativo o utilizar un algoritmo de equilibrio simultáneo (De Cea et al, 2005).
5. Con las matrices obtenidas para los escenarios  $t$  y 2008 del modelo sintético se aplica el modelo de pivoteo de las matrices 2008 base.

La aproximación general del modelo de pivoteo se ha hecho a través del cálculo de unos factores de crecimiento derivados del ratio o proporción de cambio surgido entre los viajes del modelo en escenario futuro  $t$  para cada par  $ij$  y modo  $k$  y los viajes del modelo sintético para el mismo par  $ij$  y modo  $k$  en el escenario base.

$$M_{ij,k}^t = M_{ij,k}^{base,obs} \left( \frac{V_{ij,k}^{t,mod}}{V_{ij,k}^{base,mod}} \right)$$

Esta aproximación hace que según sea el valor de los tres términos que la integran, pueden darse situaciones especiales, principalmente en aquellas áreas de crecimiento poblacional más intenso o en desarrollo sobre las que el factor de crecimiento puede “colapsar”. Frente a esta aproximación mediante un factor  $F$  proporcional al ratio entre los viajes sintéticos se encuentra el modelo aditivo en el que la movilidad nueva detectada por el modelo sintético como diferencia entre el modelo sintético del escenario  $t$  y el modelo sintético del escenario base se añade o suma al modelo de referencia o base. Esta aproximación se ha de usar únicamente en circunstancias especiales como las que se muestran a continuación.

Así, en función del valor que toman los tres componentes se identifican 10 casuísticas diferentes sobre las que hay que establecer unos criterios coherentes.

**Tabla 5-1 Casos de análisis**

OBSERVADO BASE	SINTÉTICO BASE	SINTÉTICO FUTURO	Casuística
0	0	0	1
0	0	>0	2
0	>0	0	3
0	>0	>0	4- Crecimiento normal
			5- Crecimiento extremo
>0	0	0	6
>0	0	>0	7
>0	>0	0	8
>0	>0	>0	9- Crecimiento normal
			10 - Crecimiento extremo

Fuente: Elaboración propia

Para ello se han definido los siguientes criterios que se basan en los ya aplicados en otros modelos como el modelo PRISM<sup>4</sup>.

- 1) Definir qué es cero. Los valores iniciales de tanteo serían  $10^{-3}$  o  $10^{-2}$  siendo el valor final adoptado  $10^{-2}$
- 2) Siguiendo las casuísticas anteriores según la combinación de los valores de los tres factores se especifican las siguientes alternativas:

**Tabla 5-2 Casos de análisis**

OBSERVADO BASE	SINTÉTICO BASE	SINTÉTICO FUTURO	Casuística	Valor predicho
0	0	0	1	0
0	0	>0	2	Valor del modelo Sintético de Futuro
0	>0	0	3	0
0	>0	>0	4- Crecimiento normal	0
			5- Crecimiento extremo	(1)
>0	0	0	6	Valor del observado base
>0	0	>0	7	Al observado base se le añade la diferencia de viajes sintéticos
>0	>0	0	8	0

<sup>4</sup> PRISM (Policy Responsive Integrated Strategy Model of the West Midlands) realizado por RAND Europe and Mott MacDonald para el UK Department for Transport (DfT)

OBSERVADO BASE	SINTÉTICO BASE	SINTÉTICO FUTURO	Casuística	Valor predicho
>0	>0	>0	9- Crecimiento normal	Factor de crecimiento que da el ratio entre sintético proyectado y sintético base
			10 - Crecimiento extremo	(2)

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de los casos están en la casuística 9 pero se ha de contemplar el resto para mantener una coherencia en los resultados generales del modelo.

Para los casos 5 y 10 de crecimiento extremo es necesario definir una función “estabilizadora” del crecimiento. Esta función trata el crecimiento en términos absolutos. Es decir que en el momento en que se alcance un cierto crecimiento hasta un determinado nivel, se aplica un crecimiento absoluto en vez de relativo pasando por tanto del modelo de factor o ratio al modelo aditivo.

$$\text{Viajes} = M \frac{x_1}{V^{base}} + (V^{futuro} - x_1)$$

Para el caso 5, dado que M es cero, los viajes del modelo en el escenario futuro serían:

$$\text{Viajes} = (V^{futuro} - x)$$

Para el caso 10 en cambio los viajes vendrían dados por:

$$\text{Viajes} = M \frac{x_2}{V^{base}} + (V^{futuro} - x_2)$$

Los valores de X1 y X2 vendrían dados por los siguientes parámetros

$$x_1 = G \times M^{obs}$$

$$x_2 = G \times V^{base}$$

Donde G es el factor de cambio siendo su valor:

$$G = k_1 + k_2 \times \max\left(\frac{V^{base}}{M}, \frac{k_1}{k_2}\right)$$

De esta forma G nunca es menor que 1.

**Tabla 5-3 Resultados casos de análisis**

Caso	2018		2028		2038	
	TOTAL	Veces	TOTAL	Veces	TOTAL	Veces
1	0,0%	0,2%	0,0%	0,2%	0,0%	0,2%
2	0,3%	7,3%	0,4%	7,3%	0,4%	7,3%
3	0,0%	4,5%	0,0%	4,5%	0,0%	4,5%
4	0,2%	1,9%	0,2%	1,9%	0,2%	1,9%
5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6	8,3%	8,7%	7,8%	8,7%	7,1%	8,7%
7	6,4%	6,5%	6,2%	6,5%	5,9%	6,5%
8	0,0%	0,3%	0,0%	0,3%	0,0%	0,3%
9	80,4%	69,0%	81,6%	69,0%	82,6%	69,0%
10	4,4%	1,4%	3,9%	1,4%	3,7%	1,4%
<b>Total</b>	<b>1.218.028</b>	<b>319.773</b>	<b>1.313.150</b>	<b>319.773</b>	<b>1.419.421</b>	<b>319.773</b>

Fuente: *Elaboración propia*

Los modelos de generación-distribución y reparto modal, el modelo de pivoteo y los resultados de la asignación del modelo de EMME se han integrados en una misma base de datos (ACCESS 2007), cuya estructura se presenta en el anejo C del presente documento.

## 5.1 Evaluación de la Congestión

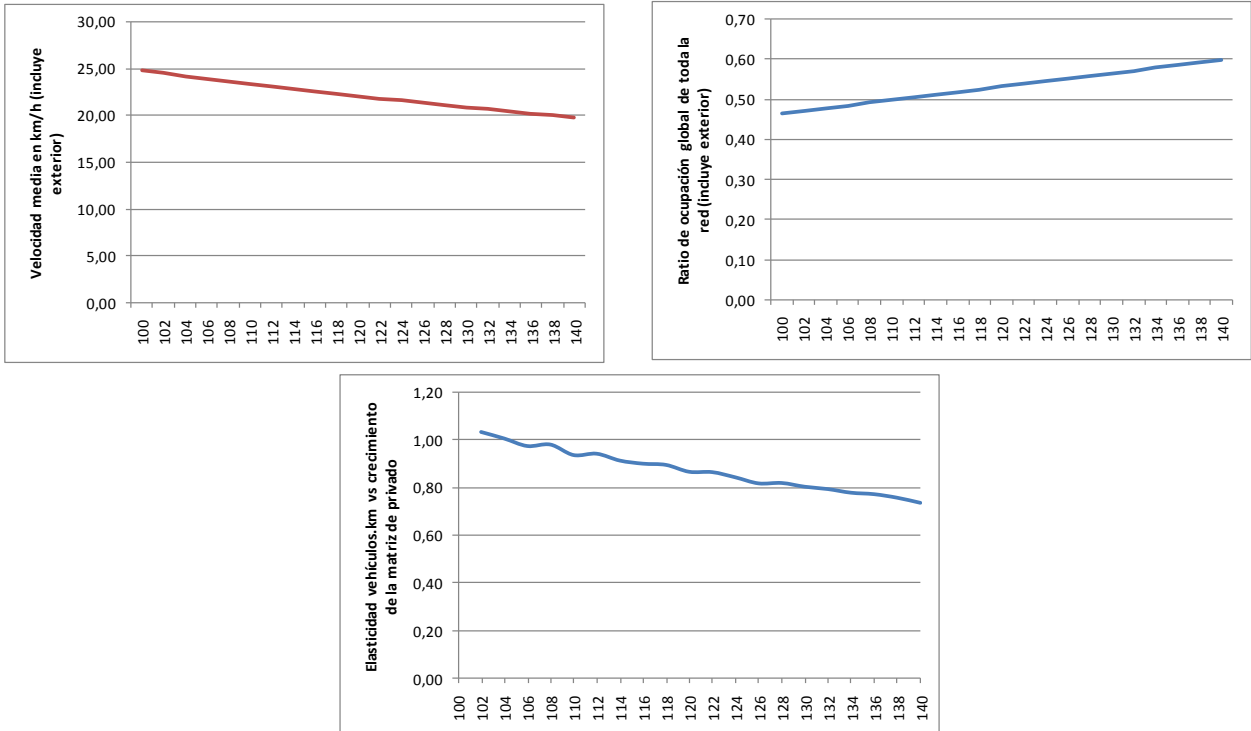
Para la evaluación de la congestión en los distintos escenarios futuros se ha llevado a cabo una simulación haciendo crecer la matriz de vehículo privado del 2008.

En este sentido, para realizar dicha simulación se han calculado los vehículos. Kilómetro y los vehículos. hora así como la ocupación de la vía. Igualmente, se ha obtenido una elasticidad vehículos. Kilómetro-crecimiento de la matriz aplicado. A diferencia del modelo anterior se han calculado las velocidades para toda la red.

Los resultados del análisis de sensibilidad realizado son los que se presentan en los siguientes gráficos y en la tabla adjunta.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Los gráficos se muestran con unos valores índices en el eje x que van de 100 a 140 que indican el crecimiento aplicado a la matriz de 2008. Así, 104 significa un crecimiento aplicado del 4%, 106 un crecimiento del 6% y así sucesivamente.

**Figura 5-1. Comportamiento de los parámetros considerados en el análisis de sensibilidad**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-4 Resultados del análisis de sensibilidad 2008.**

Escenario	Velocidad media	Ratio medio ocupacion	Veh.km	Veh.hora	Ocupado	Ofertado	Elasticidad Veh.km-Crec
100	24,88	0,46	1.995.399	80.196	4.790.092	10.301.852	
102	24,58	0,47	2.036.683	82.856	4.861.385	10.301.852	1,03
104	24,27	0,48	2.077.707	85.601	4.929.549	10.301.852	1,01
106	24,00	0,49	2.118.247	88.270	4.996.765	10.301.852	0,98
108	23,70	0,49	2.159.838	91.120	5.066.913	10.301.852	0,98
110	23,43	0,50	2.200.347	93.906	5.134.738	10.301.852	0,94
112	23,16	0,51	2.241.868	96.795	5.203.716	10.301.852	0,94
114	22,89	0,51	2.282.882	99.750	5.273.777	10.301.852	0,91
116	22,64	0,52	2.324.055	102.637	5.340.696	10.301.852	0,90
118	22,38	0,53	2.365.729	105.696	5.411.272	10.301.852	0,90
120	22,12	0,53	2.406.791	108.821	5.479.789	10.301.852	0,87
122	21,88	0,54	2.448.491	111.927	5.549.216	10.301.852	0,87
124	21,64	0,55	2.489.846	115.059	5.618.124	10.301.852	0,84
126	21,39	0,55	2.530.642	118.305	5.685.174	10.301.852	0,82
128	21,16	0,56	2.572.192	121.563	5.756.290	10.301.852	0,82
130	20,93	0,57	2.613.616	124.888	5.822.546	10.301.852	0,81
132	20,71	0,57	2.655.190	128.190	5.893.888	10.301.852	0,80
134	20,48	0,58	2.696.620	131.658	5.961.764	10.301.852	0,78
136	20,26	0,59	2.738.363	135.129	6.031.181	10.301.852	0,77
138	20,05	0,59	2.779.937	138.636	6.100.663	10.301.852	0,76
140	19,84	0,60	2.820.958	142.176	6.167.782	10.301.852	0,74
Pendiente	-20%	29%					
Elasticidad	-0,51	0,72					
Vehículos O8		303.316					
Distancia media O8		6,58					
Distancia media O8+40%		6,64					
Incremento Tiempos		<b>26,6%</b>					

Fuente: Elaboración propia

Analizando los gráficos anteriores y la tabla de resultados, se comprueba que con un crecimiento del 40% de la demanda:

- Se produce una pérdida de velocidad de 5km/h, esto es, un 20% de la velocidad modelada en 2008.
- Se observa un incremento medio de la distancia media recorrida muy limitado, es decir, una baja capacidad de cambio de rutas (de 6.58 km a 6.64 km)
- En consecuencia con lo anterior, se produce un incremento medio del tiempo de viaje del 26% (6,64km / 19,84 km/h = 20 min frente a 6,58 km / 24,88 km/h = 15,86 min). En otras palabras, un incremento **medio** de **4 minutos**.

La primera conclusión del análisis es que ese crecimiento parece mucho más sostenible que en el caso obtenido con tiempos calibrados en la anterior propuesta elaborada en Junio por el Grupo Consultor (en este caso, la velocidad media caía a 9km/h con un 38% de crecimiento).

De esta forma, dados los condicionantes de sensibilidad aquí analizadas y observando los distintos resultados obtenidos, se ha mantenido el resultado directo del modelo de pivoteo, sin realizar ningún proceso adicional de limitación al crecimiento de los viajes de la hora punta en vehículo privado.

## 6 MATRICES DE VIAJES: ANÁLISIS Y COMPARATIVA

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del modelo de demanda de viajeros, en el que se integraron en una misma base de datos (Access2007) los modelos de generación-distribución y reparto modal de viajes y los resultados de la asignación del modelo de EMME. Se ha procedido según lo descrito en el Anejo C, concretamente siguiendo el proceso de ejecución del modelo integrado en Access detallado en el capítulo C.3 del mismo documento.

Los resultados presentados corresponden a cada uno de los escenarios de análisis de este estudio: el escenario base (2008), el escenario a corto plazo (2018), el escenario a mediano plazo (2028) y el escenario a largo plazo (2038). En este sentido, el análisis se centra en (1) la evolución de la demanda total de viajeros y el reparto modal resultante entre el transporte público y el vehículo privado, (2) la evolución de la distribución geográfica de los viajes, (3) el desequilibrio de la movilidad resultante, (4) la distancia media de los flujos y (5) la estructura de los viajes. Adicionalmente, se analiza para cada escenario el patrón de la movilidad por zonas de transporte.

### 6.1 Demanda total de viajeros

Los resultados de **demanda de viajeros** (vehículo privado, transporte público y total) para los cuatro escenarios considerados (2008, 2018, 2028 y 2038) así como la variación de cada uno respecto al escenario base quedan reflejados en la siguiente tabla:

**Tabla 6-1. Demanda total de viajeros para los cuatro escenarios considerados.**

	Viajes 2008	2018		2028		2038	
		Viajes	% Variación 2008-2018	Viajes	% Variación 2008-2038	Viajes	% Variación 2008-2038
Vehículo Privado	347.657	411.994	19%	460.743	33%	520.317	50%
Transporte Público	667.320	779.724	17%	847.891	27%	962.892	44%
<b>TOTAL</b>	<b>1.014.977</b>	<b>1.191.718</b>	<b>17%</b>	<b>1.308.634</b>	<b>29%</b>	<b>1.483.209</b>	<b>46%</b>

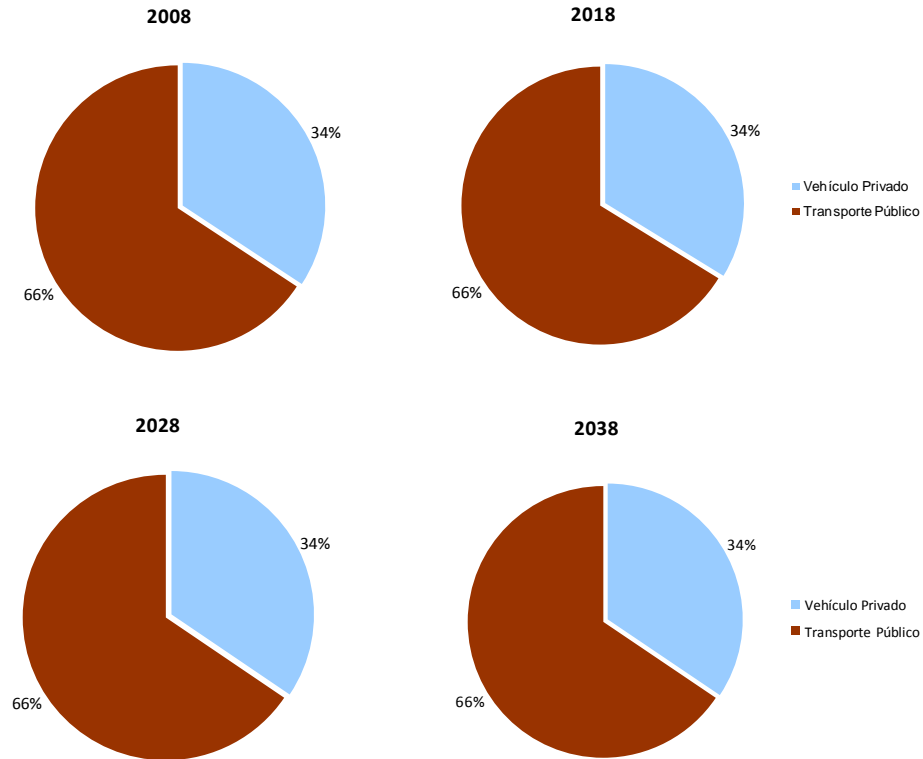
*Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado*

Tal y como se observa en la tabla anterior el número total de viajes crece un 49% entre el escenario base (2008) y el escenario a largo plazo (2038), siendo el crecimiento relativo al transporte público (48%) muy similar al del vehículo privado (50%).

A modo ilustrativo, se presenta a continuación un gráfico con el **reparto modal** resultante entre el transporte público y el vehículo privado para los cuatro escenarios considerados:



**Figura 6-1. Reparto modal resultante entre el vehículo privado y el transporte público para los cuatro escenarios considerados.**



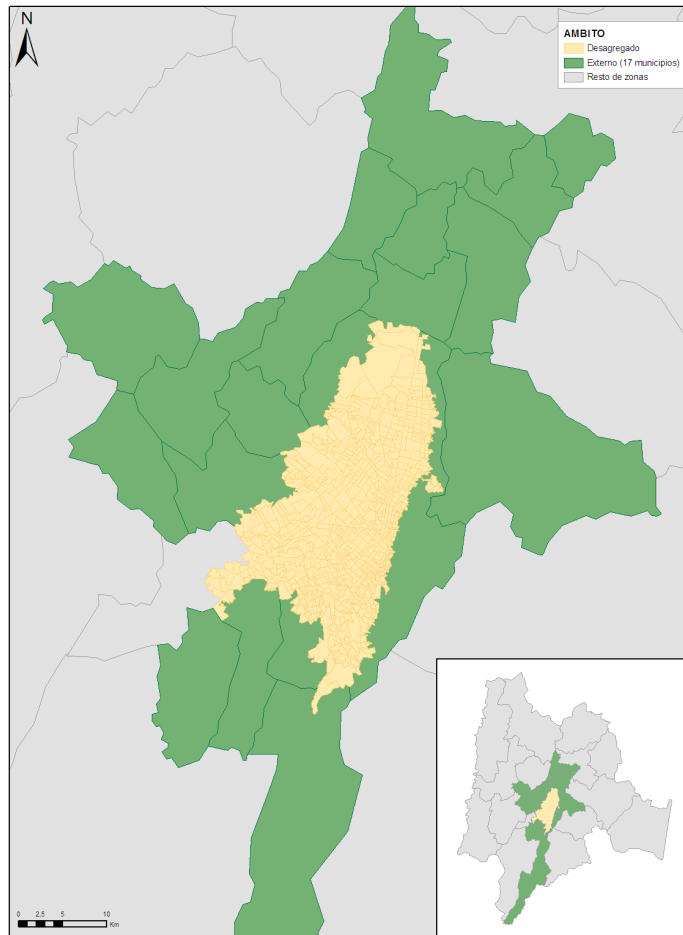
*Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado*

A la vista de los resultados, se puede comprobar que tanto el peso del transporte público como el del vehículo privado se mantienen entre el escenario base y el de largo plazo (66% y 34% respectivamente).

## 6.2 Evolución de los viajes según su distribución geográfica

De forma general, para los análisis que se describen a continuación, se han tenido en cuenta la zonificación reflejada en la Figura 6-2. En este sentido, se han considerado tres (3) ámbitos distintos: el primero (1) incluye las zonas de transporte del perímetro urbano correspondiente a los municipios de Bogotá D.C y Soacha, el segundo (2) corresponde a las zonas de transporte de los 17 municipios aledaños y el tercero (3) a las zonas del resto de municipios.

**Figura 6-2. Zonificación empleada para el análisis.**



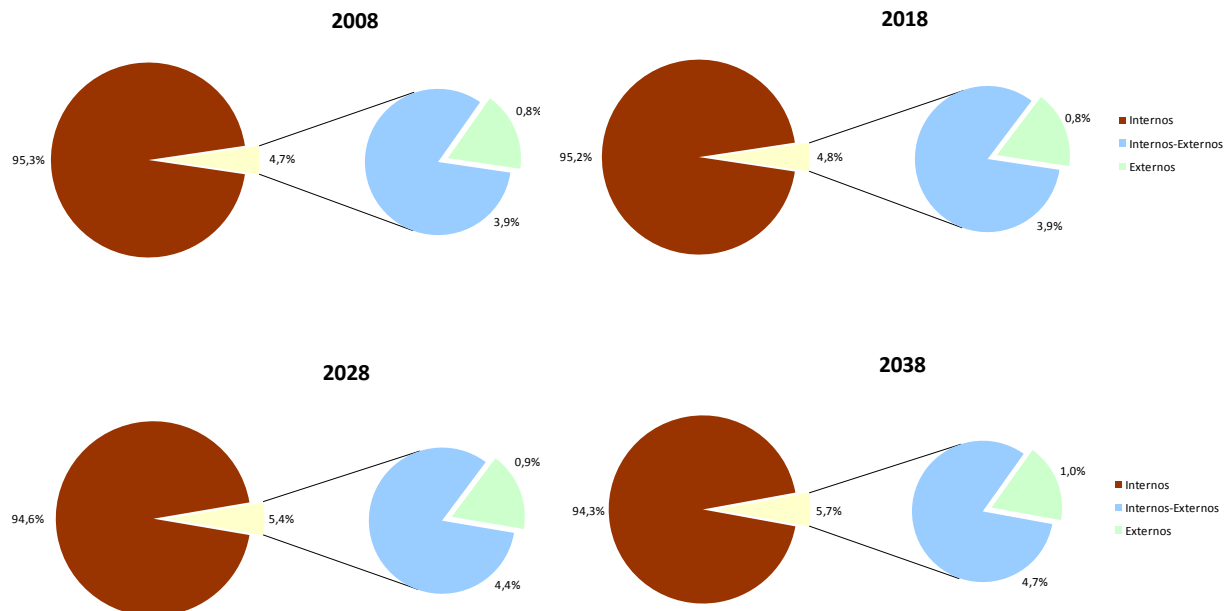
*Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado*

Sin embargo, para presentar la **evolución de los viajes según su distribución geográfica**, se ha optado por realizar un análisis teniendo en cuenta dos ámbitos geográficos más agregados: ámbito interno y ámbito externo. El ámbito interno incluye las zonas de transporte del perímetro urbano correspondiente a los municipios de Bogotá D.C y Soacha mientras que el ámbito externo agrega el resto de municipios del ámbito de estudio.

En este sentido, se ha analizado la movilidad (en viajes totales, esto es, público y privado) según tres tipos de relaciones: la primera hace referencia a los viajes de carácter interno (con pares OD en los municipios de Soacha y Bogotá D.C), la segunda representa los viajes que tienen Origen en dichos municipios y Destino en el resto y al revés (Interno-Externo) y por último las relaciones de carácter externo (con pares OD en el resto de municipios).

Los resultados de este análisis, para los cuatro escenarios considerados quedan reflejados en la siguiente figura:

**Figura 6-3. Distribución geográfica de los viajes totales en los escenarios considerados.**



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado

Tal y como se puede observar el porcentaje de viajes internos disminuye ligeramente durante el período 2008-2038 (de un 95,3% a un 94,3%) mientras que el porcentaje de los viajes no internos (que incluye los viajes internos-externos y los viajes externos) aumenta de un 3,9% a un 4,7% para el mismo período. Por otro lado, en la distribución porcentual de estos últimos se constata que el peso de los viajes externos (respecto al total de viajes no internos) se mantiene en un 18% para el mismo período.

### 6.3 Desequilibrio de la movilidad

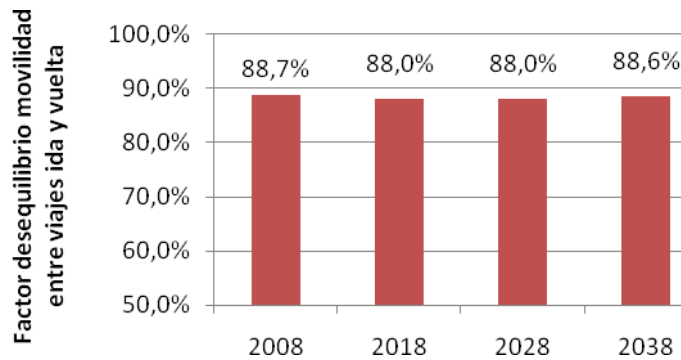
Otro punto de interés para el análisis de la demanda es el **desequilibrio de la movilidad** durante la hora punta que tiene por objeto analizar básicamente la direccionalidad de los flujos entre zonas, dentro un ámbito determinado.

Se ha considerado oportuno analizar este punto desde el punto de vista del ámbito interno puesto que, tal y como se ha comentado anteriormente, es el ámbito donde se producen la gran mayoría de viajes (aproximadamente un 95%) y por lo tanto tiene un mayor interés de análisis.

El resultado de este análisis es el factor de desequilibrio de la movilidad, el cual se puede definir según el desequilibrio entre los flujos de la zona O hacia la zona D y los de la zona D hacia la zona O. Se calcula para cada relación entre dos zonas OD el cociente entre el mayor de los dos flujos (cada uno en un sentido) y la suma de los dos. La suma ponderada (según los flujos) de los cocientes para todas las relaciones determina el valor del parámetro. El factor de desequilibrio así definido está entre el 50% y el 100%, el 50% correspondiendo a flujos equilibrados en los dos sentidos.

El siguiente gráfico refleja cómo varía el factor de desequilibrio de la movilidad para los distintos escenarios:

**Figura 6-4. Factor de desequilibrio de la movilidad en el ámbito interno para los diferentes escenarios considerados.**



*Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado*

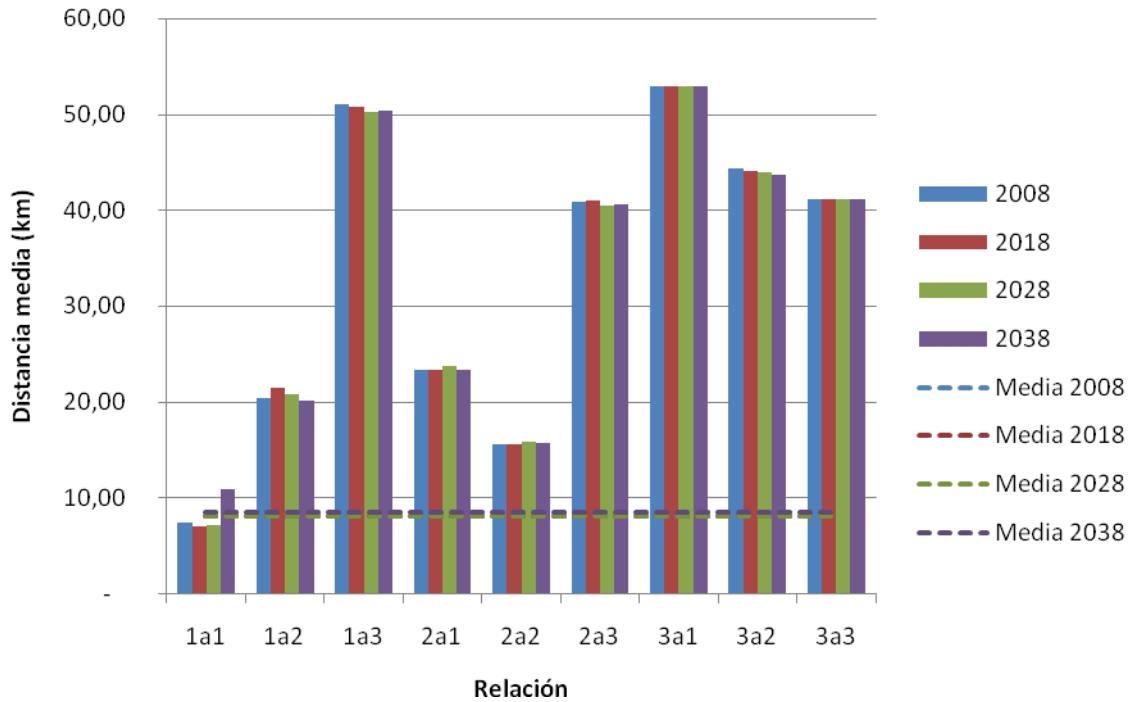
Tal y como se observa, el factor de desequilibrio entre viajes orientados del ámbito interno se mantiene alrededor de 88% - 89% durante el período 2008-2038, significando que no hay importantes cambios en la direccionalidad de los viajes entre zonas.

#### **6.4 Distancia media de los flujos**

Otro punto de análisis es la **distancia media de los flujos** obtenidos en las matrices. Se considera la distancia euclidiana entre los centroides de las zonas de transporte. Empleando la zonificación anteriormente comentada<sup>6</sup> se ha analizado este parámetro, los resultados de los cuales (según escenario y tipo de movimiento) se reflejan en el siguiente gráfico:

<sup>6</sup> Se ha realizado una codificación de las zonas de forma que **1** es el ámbito desagregado de Bogotá D.C y Soacha (o ámbito interno); **2** los 17 Municipios aledaños; y **3** el Resto de Municipios

**Figura 6-4. Distancia media de los flujos según tipo de movimiento para cada uno de los escenarios considerados.**



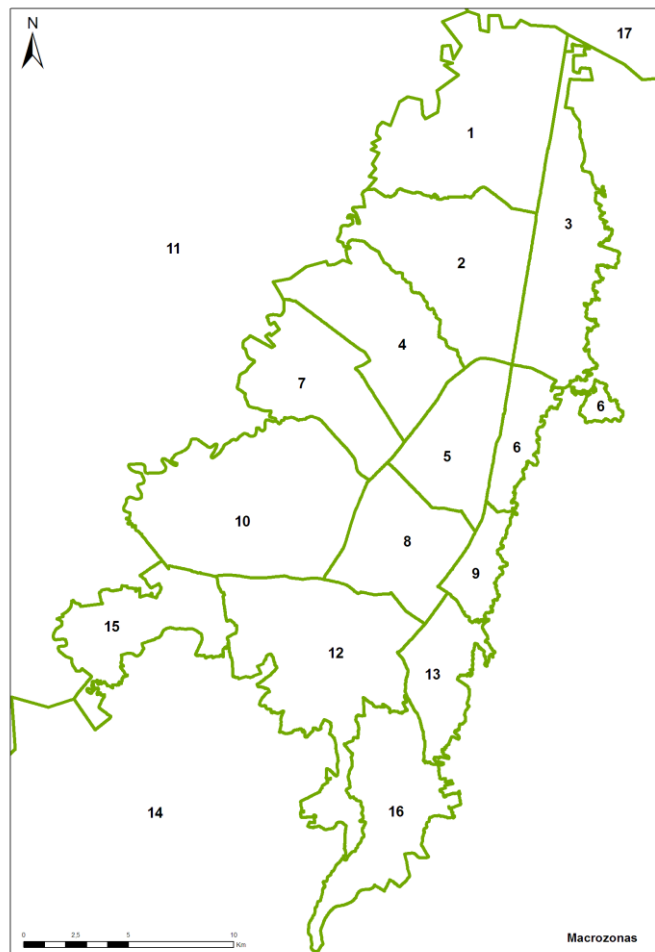
*Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado*

A la vista de los resultados, la distancia media crece ligeramente para el período 2008-2038, pasando de 8,4 km en 2008 a 8,5 km en 2038, siendo en los escenarios 2018 y 2028 inferior a la del escenario base. Tal y como se observa, la distancia media (ponderada) está muy cerca de la correspondiente al movimiento 1a1 (viajes internos) puesto que es en este ámbito donde se producen la gran mayoría de viajes.

## 6.5 Estructura de los viajes

Finalmente, otro aspecto de interés es el análisis de la estructura de los viajes en el que se determina el comportamiento de las distintas relaciones OD dentro del ámbito de estudio. Para ello, se ha considerado oportuno emplear una zonificación agregada compuesta por 17 macrozonas, que quedan detalladas con su respectiva numeración en la siguiente figura:

Figura 6-5. Zonificación empleada para el análisis de la estructura de los viajes



Fuente: Elaboración propia

En este sentido, se han obtenido las 8 principales relaciones, esto es, los viajes OD con un mayor peso respecto al total entre las distintas macrozonas. Los resultados de este análisis para cada uno de los escenarios considerados en el estudio se presentan en forma de tabla tal y como sigue:

Tabla 2. Principales relaciones de viaje para cada uno de los escenarios considerados.

2008			2018			2028			2038		
Macrozona ORIGEN	Macrozona DESTINO	% Viajes totales	Macrozona ORIGEN	Macrozona DESTINO	% Viajes totales	Macrozona ORIGEN	Macrozona DESTINO	% Viajes totales	Macrozona ORIGEN	Macrozona DESTINO	% Viajes totales
3	3	3,34%	3	3	3,45%	3	3	3,39%	3	3	4,18%
2	3	2,62%	10	10	2,81%	10	10	2,87%	10	10	2,70%
10	10	2,60%	2	3	2,53%	2	3	2,37%	1	3	2,61%
10	8	2,46%	10	8	1,87%	4	4	2,05%	2	3	2,12%
12	8	2,07%	4	4	1,86%	2	2	1,82%	4	4	1,92%
3	6	1,82%	9	9	1,82%	10	8	1,73%	3	6	1,74%
10	9	1,72%	12	8	1,77%	9	9	1,69%	2	2	1,73%
10	7	1,72%	2	2	1,77%	12	8	1,65%	3	2	1,53%

Fuente: Elaboración propia

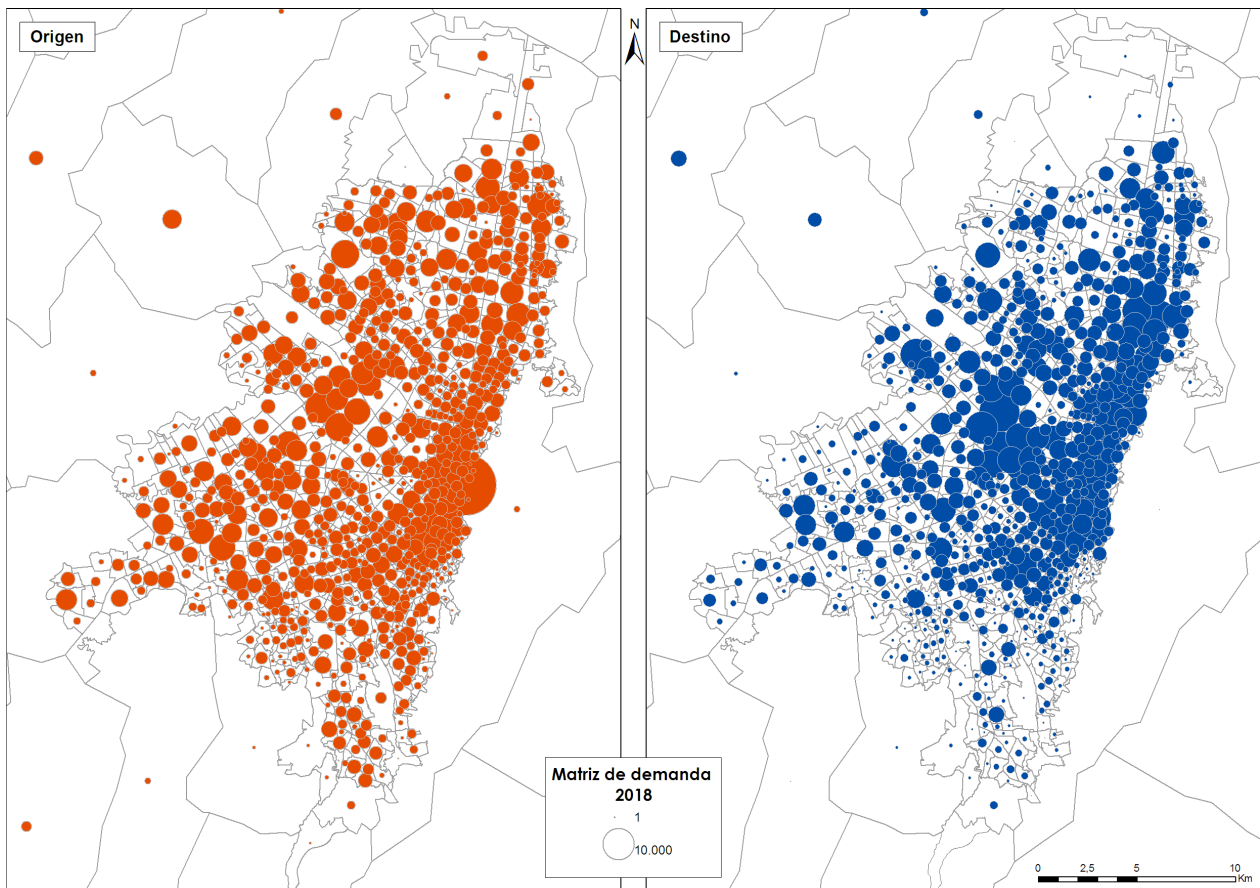
Tal y como se deduce de la tabla superior, la mayor parte de las principales relaciones correspondientes al escenario base se han mantenido para los distintos escenarios futuros. De forma más detallada, se puede observar que hay dos (2) relaciones que varían significativamente respecto al 2008: (1) la que tiene origen en las localidades de Bolsa y Kennedy<sup>7</sup> y destino en las localidades de Candelaria y Santa Fe pierde peso, siendo un 1,7% en 2008 y un 0,8% en 2038 mientras que (2) la que tiene origen en Suba (Norte) y destino en Usaquén gana importante peso, siendo un 0,6% en 2008 y un 2,6% en 2038.

## 6.6 Patrón de movilidad por zonas de transporte

### 6.6.1 Generación y atracción por zonas

Los siguientes mapas ilustran los viajes emitidos y atraídos por zona en cada uno de los escenarios futuros contemplados.

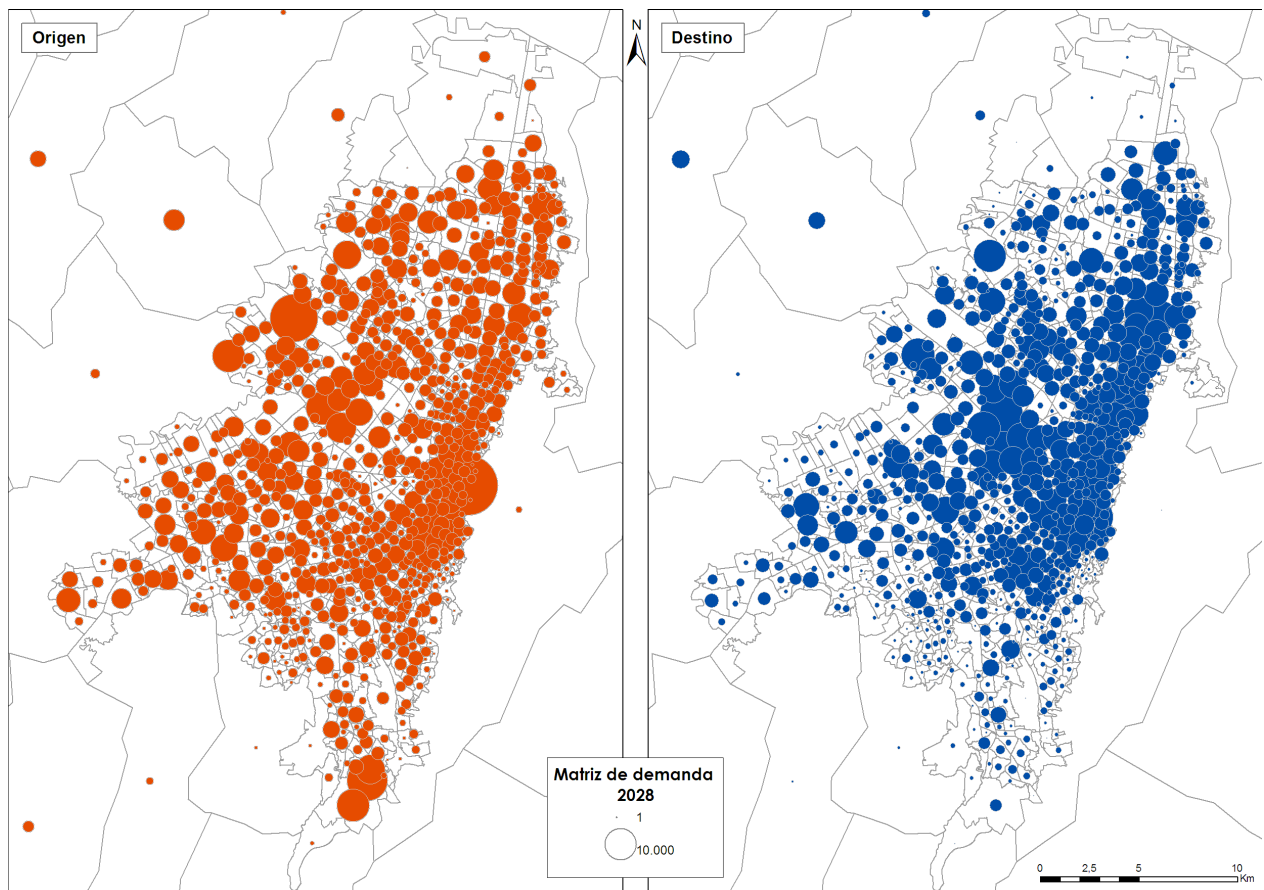
Figura 6-6. Generación y atracción por zona de la matriz 2018



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado

<sup>7</sup> A pesar de que el ámbito de las macrozonas y las localidades no es el mismo, de cara a la redacción se ha optado por nombrar a las primeras con la/s localidad/es más acorde/s en cada caso.

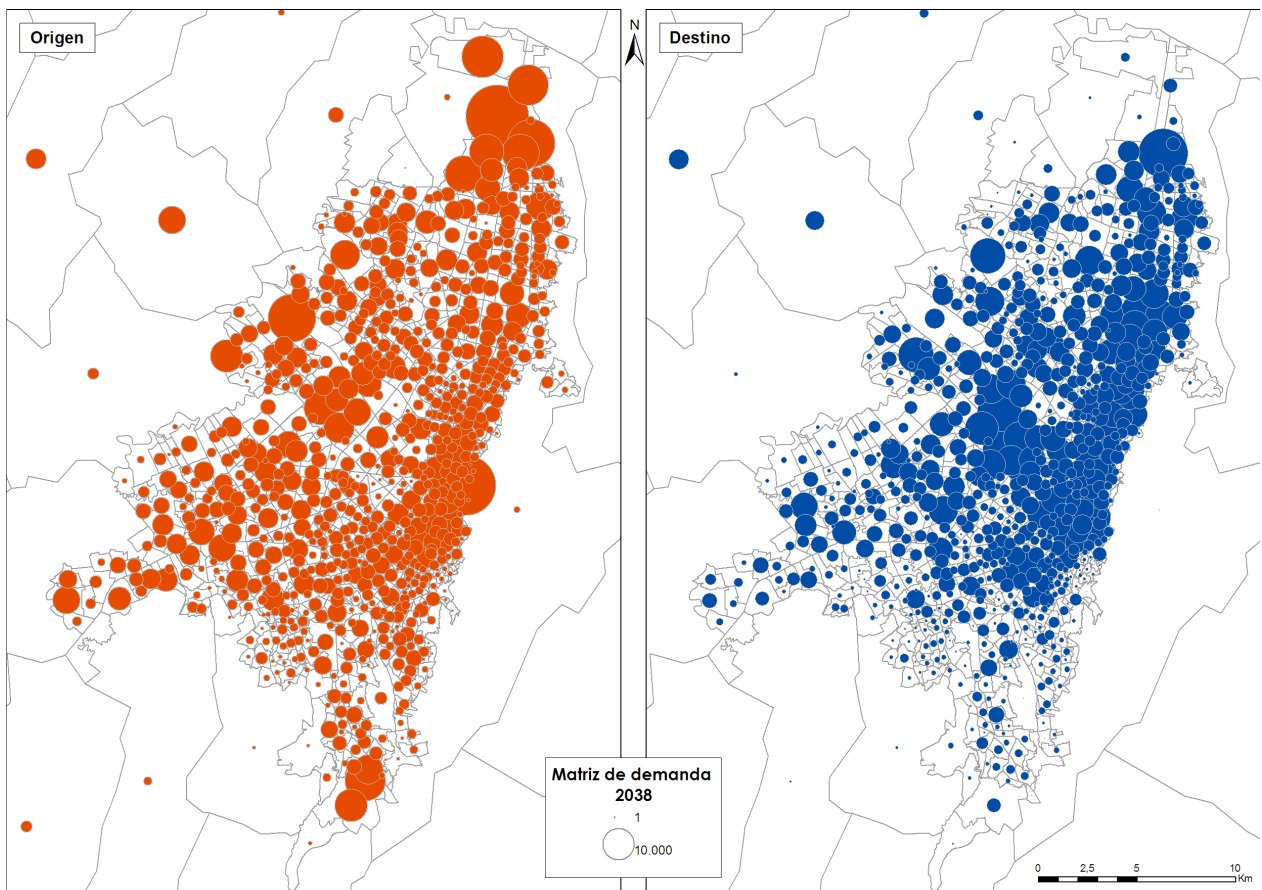
Figura 6-7. Generación y atracción por zona de la matriz 2028



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado



Figura 6-8. Generación y atracción por zona de la matriz 2018



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado

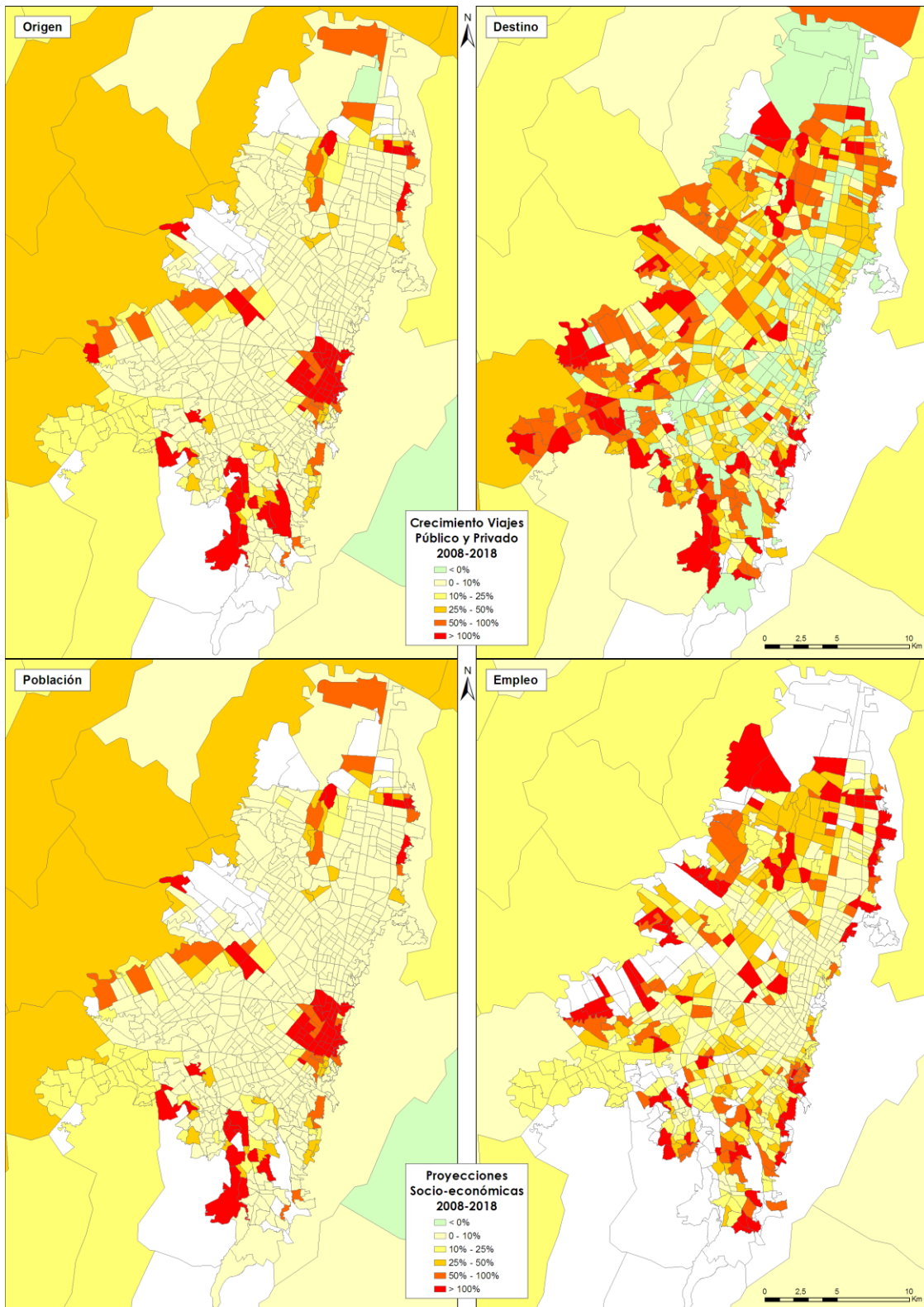
## 6.6.2 Crecimiento entre escenarios

Se han elaborado unos mapas que se adjuntan a continuación, donde se ilustra el crecimiento tanto del número de viajes (en origen y destino) como de las variables socioeconómicas (población y empleo) para los períodos 2008-2018, 2018-2028 y 2028-2038.

Tal y como se puede observar, para cada uno de los períodos analizados, la correlación entre la población y los viajes generados (origen) es buena, siendo los crecimientos tanto de la variable socioeconómica como de los viajes muy similares en ambos casos.

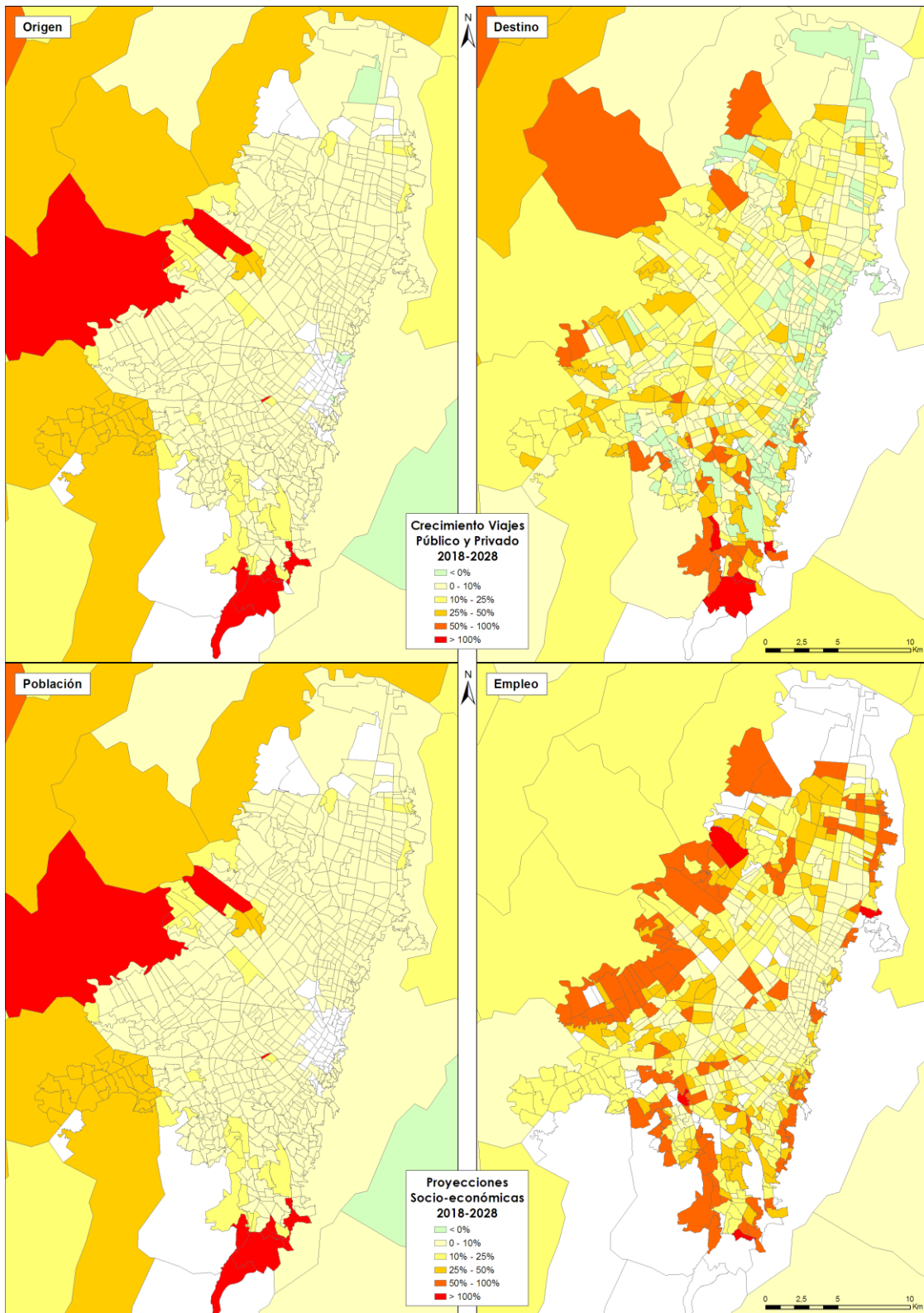
En el caso de la atracción, la correlación no es tan directa porque el número de viajes atraídos por una zona no sólo depende de si crece el empleo en esa zona. La atracción de cada zona cambia en función de cómo varíe la atraktividad relativa de cada zona y esa atraktividad relativa es medida por el producto del empleo de esa zona por la dificultad de llegar a esa zona desde la zona origen en relación a la misma atraktividad del resto de zonas potenciales. En los casos donde hay una variación importante de accesibilidad en red (por ejemplo, hacia las zonas donde se mejora la situación por la fase 3 de TransMilenio o la ampliación de la red troncal hacia Soacha), se induce una mayor atraktividad independientemente del crecimiento de la variable empleo.

Figura 6-9. Crecimiento de los viajes y las variables socioeconómicas durante el período 2008-2018



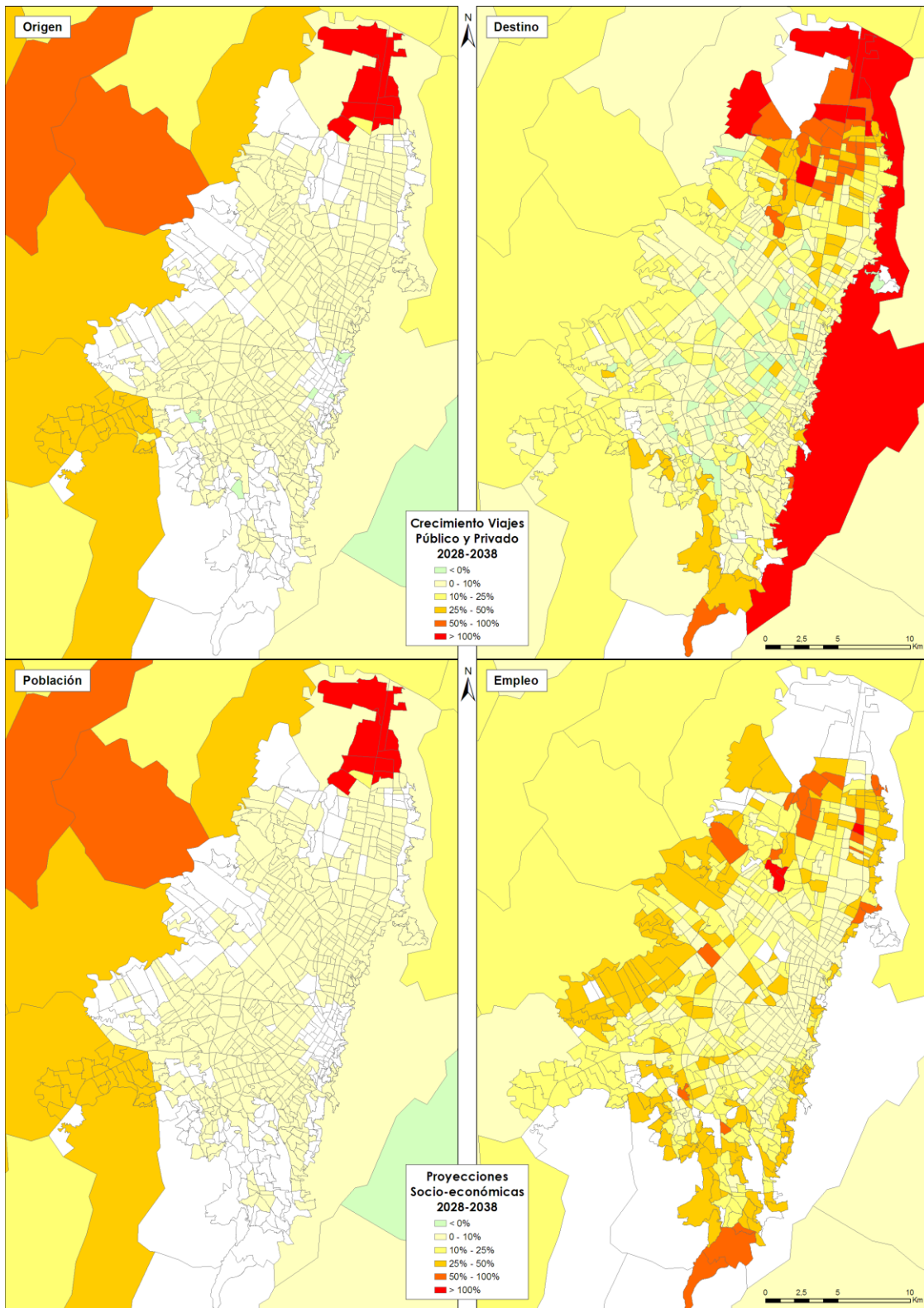
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado

Figura 6-10. Crecimiento de los viajes y las variables socioeconómicas durante el período 2018-2028



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado

Figura 6-11. Crecimiento de los viajes y las variables socioeconómicas durante el período 2028-2038



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de demanda realizado

## 6.7 Emmebank

Las matrices obtenidas a partir del modelo de generación – atracción para cada uno de los escenarios analizados se han incluido en el banco de datos de EMME que forma parte del producto 04 y se adjuntan en formato texto al presente documento.

Dichas matrices se encuentran identificadas en el banco con los siguientes códigos:

- mf184 VjP18o 'Matriz total viajes privados 2018 inicial'
- mf185 VjP28o 'Matriz total viajes privados 2028 inicial'
- mf186 VjP38o 'Matriz total viajes privados 2038 iterada'
- mf187 TP18o 'Matriz total transporte público 2018 inicial'
- mf188 TP28o 'Matriz total transporte público 2028 inicial'
- mf189 TP38o 'Matriz total transporte público 2038 iterada'

## 7 GLOSARIO

<b>BRT</b>	Transporte Rápido en Buses - Bus Rapid Transit. Plataforma de uso exclusivo para este tipo de vehículos.
<b>Coefficiente R<sup>2</sup></b>	Coefficiente de ajuste de la regresión
<b>D.C.</b>	Distrito Capital de Bogotá
<b>DANE</b>	Departamento Nacional de Estadística de Colombia
<b>DNP</b>	Departamento Nacional de Planeación
<b>EDM 05</b>	Encuesta de Movilidad realizada por el DANE en el año 2005
<b>FONDATT – STT</b>	Secretaría de Tránsito y Transporte
<b>GC</b>	Grupo Consultor
<b>GEH</b>	Índice de comprobación de ajuste de matrices
<b>IDU</b>	Instituto de Desarrollo Urbano. Establecimiento público descentralizado, con personería jurídica, patrimonio propio, autonomía administrativa. Su misión es la ejecución de obras viales y de espacio público para el desarrollo urbano de Bogotá D.C.
<b>IMAT</b>	Estaciones de intercambio entre el Transporte Privado y el Transporte Público
<b>IMCOM</b>	Estaciones de Intercambio Modal -Entre sistema complementario y masivo y modos no motorizados-
<b>IMIT</b>	Estaciones de Intercambio de Ruta entre T. Interurbano y el componente flexible o transporte público
<b>IPC</b>	Índice de Precios al Consumidor. Mide la evolución del conjunto de precios de los bienes y servicios que consume la población residente.
<b>ISS</b>	Instituto de Seguros Sociales - Empresa estatal, con personería jurídica, autonomía administrativa y capital independiente, vinculada al Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Principal actor en el campo de la Seguridad Social en Colombia.

<b>JICA</b>	Japan International Cooperation Agency. Agencia Japonesa para el Desarrollo Internacional. Realizó entre 2000 y 2003 un estudio para el Gobierno de la República de Colombia solicitado por la empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado tanto para Bogotá como para la Sabana de Bogotá.
<b>OD</b>	Origen - Destino
<b>PIB</b>	Producto Interno Bruto
<b>PLM</b>	Primera Línea de Metro
<b>PMM</b>	Plan Maestro de Movilidad. Año 2006, elaborado a partir de la EDM 05
<b>PMT</b>	Plan de Manejo del Tránsito. Implementado por la Secretaría de Movilidad y Transporte de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
<b>POT</b>	Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C. Año 2005
<b>SDM</b>	Secretaría de Movilidad de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
<b>SDP</b>	Secretaría Distrital de Planeación de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
<b>SITP</b>	Sistema Integrado de Transporte Público para la ciudad de Bogotá
<b>STT</b>	Secretaría de Tránsito y Transporte - Hoy SDM
<b>STU</b>	Sistema de Transporte Urbano
<b>TM</b>	TransMilenio
<b>TMB</b>	Transporte Metropolitano de Barcelona
<b>ToR</b>	Términos de Referencia
<b>TPC</b>	Transporte público colectivo
<b>UPZ</b>	Unidades de Planeamiento Zonal