

IMPACTO DE LOS FACTORES SOCIOECONÓMICOS Y COGNITIVOS EN LA OPTIMALIDAD DE RUTAS DE VIAJE EN TRANSPORTE PÚBLICO

Carlos Céspedes ^{1*}, Sebastián Raveau ¹

¹ Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile

*Autor para
correspondencia:
cacespedes@uc.cl

RESUMEN

Usualmente, los modelos de elección de ruta asumen que todos los viajeros minimizan su tiempo esperado total de viaje (*TETV*). Para verificar esto, se encuestaron 300 usuarios de transporte público santiaguino. Sobre ellos se encontró que: i) no todos fueron capaces de minimizar su *TETV* en 8 redes hipotéticas de transporte público de alta frecuencia utilizando alternativas óptimas o subóptimas de viaje; y ii) los factores socioeconómicos y cognitivos impactan sobre dicha capacidad. Por tanto, suponer que los viajeros minimizan su *TETV* no es adecuado, puesto que el comportamiento de los encuestados no es estrictamente homogéneo, óptimo, ni complejo.

Palabras clave Transporte público, estrategias de viaje, factores socioeconómicos y cognitivos.

ABSTRACT

Usually, route choice models assume that all travelers minimize their total expected travel time (*TETT*). To verify this, 300 users of Santiago public transport were surveyed. From them it was found that: **i)** not all were capable to minimize their *TETT* in 8 hypothetical networks of high frequency public transport using optimal or suboptimal travel alternatives; and **ii)** the socioeconomic and cognitive factors impact on said capacity. Therefore, supposing that travelers minimize their *TETT* is not adequate, since the behavior of the respondents is not strictly homogeneous, optimal, nor complex.

Keywords Public transport, travel strategies, socioeconomic and cognitive factors.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de elección de ruta juegan un rol importante en la planificación y configuración del transporte público. Según Prato (2009), estos modelos permiten: i) pronosticar el comportamiento de las personas ante escenarios hipotéticos; ii) predecir futuras condiciones del tráfico en la red de transporte; y iii) comprender la reacción y adaptación de los usuarios del transporte ante la disponibilidad de diversas fuentes de información. Por otro lado, facilitan algunas de las herramientas necesarias a los tomadores de decisión para resolver y/o encontrar un equilibrio entre la oferta y demanda del sistema de transporte público urbano. Específicamente, estos modelos son utilizados para resolver el problema de asignación (Ortúzar y Willumsen, 2011).

Sin embargo, la modelación de elección de ruta no está exenta de desafíos, puesto que no necesariamente el modelador tiene conocimiento del comportamiento (preferencias y percepciones) de los usuarios del sistema. Ante eso, usualmente la literatura asume que en la realidad todos los viajeros: i) minimizan su tiempo esperado total de viaje ($TETV$), es decir, el tiempo de espera (t_e) más el tiempo de viaje a bordo del vehículo (t_v); y ii) utilizan modelos complejos de elección de ruta. Particularmente, existen algunos *softwares* de asignación de transporte como ESTRAUS que modelan la conducta de las personas por medio del Modelo de Rutas Mínimas (De Cea et al., 2003). Más aun, hay otras herramientas computacionales similares como EMME o VISUM que consideran que todos los viajeros basan su elección de ruta mediante el Modelo de Estrategias Mínimas (Hildebrand y Hörtn, 2014).

No obstante, investigaciones recientes como la de Raveau y Muñoz (2014) sostienen que conjeturar que todos los viajeros se comportan bajo un único modelo de elección de ruta podría no ser apropiado. En términos concretos, los resultados de aquella investigación revelan que el 67% de los usuarios de transporte público utilizan el Modelo de Itinerarios Mínimos, 29% el Modelo de Rutas Mínimas, y 4% el Modelo de Estrategias Mínimas. Sin embargo, todavía no existen pruebas formalmente concluyentes -ni positivas ni negativas- respecto al primer supuesto de la modelación: “todos los viajeros minimizan su $TETV$ ”.

Bajo este contexto, la presente investigación se focalizó en probar o rechazar la veracidad de dicho postulado. En la Sección 2 se expone el contexto teórico detrás de los modelos de elección de ruta; en la Sección 3 se describe la construcción de la encuesta utilizada para llevar a cabo el estudio; en la Sección 4 se detalla la aplicación de la encuesta; en la Sección 5 se presenta cómo se modelaron los datos y los resultados obtenidos; y finalmente en la Sección 6 se mencionan las conclusiones que se desprenden de la investigación.

2. MODELACIÓN DE ELECCIÓN DE RUTA

Generalmente, la modelación de elección de ruta estima que los viajeros de transporte público de alta frecuencia se comportan bajo tres tipos de alternativas de viaje: i) itinerario (IT), ii) línea común (LC); e iii) hiper-ruta (HY).

Específicamente, IT se define como un tipo de alternativa de viaje en la cual, dado un par de nodos origen-destino (O-D), el viajero selecciona una secuencia de secciones de línea adyacentes. En ese sentido, una sección de línea consiste en una porción de una línea L_b entre dos nodos (M y N) no necesariamente consecutivos de su recorrido (Ortúzar y Willumsen, 2011).

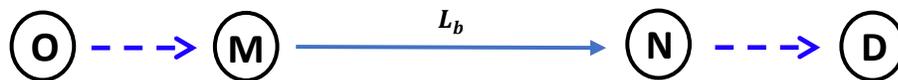


Ilustración 1 Itinerario

En tanto, una LC se define como un tipo de alternativa de viaje que se basa en el siguiente comportamiento de los viajeros: dado un par O-D, existe al menos un par de nodos M y N sobre los cuales hay un conjunto X de líneas que son atractivas para el usuario de transporte público. Si

el viajero, a priori, selecciona las líneas atractivas del conjunto X , y además aborda el primer vehículo que arriba al nodo M que pertenezca a la línea L_b (con $L_b \in X$), entonces él usa una LC .

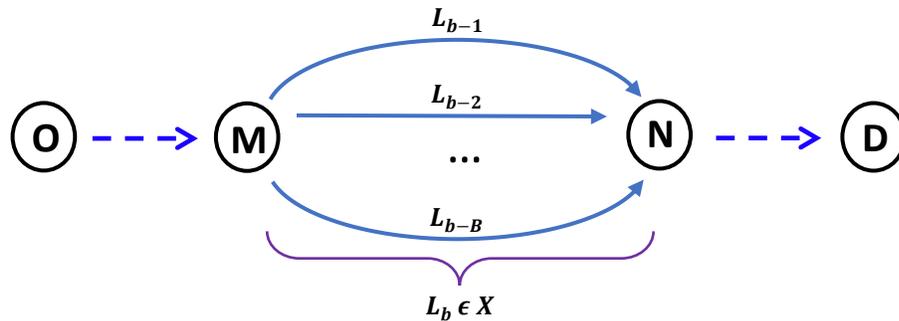


Ilustración 2 Línea común

Finalmente, una HY se define como un tipo de alternativa de viaje que se basa en el siguiente comportamiento de los viajeros: dado un par O-D, existe al menos un nodo M sobre el cual hay un conjunto X de líneas que son atractivas para el usuario de transporte público, y que viajan a distintos nodos N. Si el viajero, a priori, selecciona las líneas atractivas del conjunto X , y además aborda el primer vehículo que arriba al nodo M que pertenezca a la línea L_b (con $L_b \in X$), entonces él usa una HY .

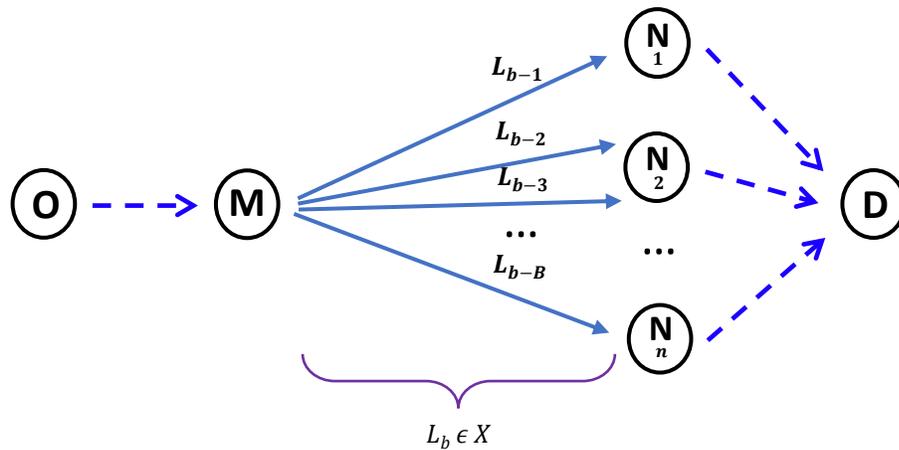


Ilustración 3 Hiper-ruta

En ese sentido, se han planteado tres modelos de elección de ruta para modelar el comportamiento de las personas al interior de las redes de transporte público de alta frecuencia. Uno de estos es el Modelo de Itinerarios Mínimos, el cual asume que, dado un par O-D, una persona utilizará el IT que posea el menor $TETV$. Por otro lado, se encuentra el Modelo de Rutas Mínimas (Chriqui y Robillard, 1975), el cual propone que, dado un par O-D, el viajero usará el IT o la LC que posea menor $TETV$. Por último, está el Modelo de Estrategias Mínimas (Spiess y Florian, 1989) que generaliza la modelación de los modelos anteriores, puesto que supone que el viajero utilizará el IT , la LC o la HY que minimiza el $TETV$ entre el par O-D.

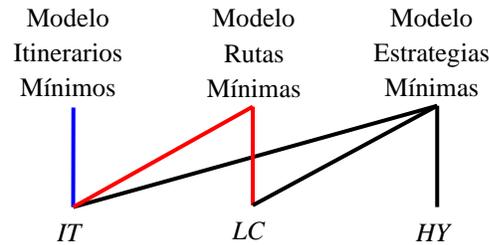


Ilustración 4 Tipos de alternativas de viaje vs modelos de elección de ruta

De esta manera, si la alternativa de viaje que minimiza el *TETV* entre el par O-D es un *IT*, entonces los tres modelos convergerán a la misma solución. No obstante, si corresponde a una *LC*, el Modelo de Itinerarios Mínimos encontrará una alternativa subóptima de viaje. Es más, si es una *HY*, los Modelos de Itinerarios Mínimos y Rutas Mínimas hallarán alternativas subóptimas de viaje. Por tanto, por construcción, el Modelo de Estrategias Mínimas siempre encuentra la alternativa óptima de viaje (i.e. aquella que posee el menor *TETV* en relación con el resto de las alternativas presentes).

3. DISEÑO DE LA ENCUESTA

Para verificar si las personas minimizan su *TETV* al interior del transporte público de alta frecuencia, se realizó una aproximación a este problema. Específicamente, se determinó estudiar si las personas cuentan con la capacidad de realizar aquello sobre redes hipotéticas de transporte público de alta frecuencia (*RHTP*), para luego analizar cuáles son los factores socioeconómicos y cognitivos que inciden en dicha capacidad. Para llevar esto a cabo, se diseñó una encuesta compuesta de dos evaluaciones: M10 e Hyperpath.

Por una parte, M10 corresponde una prueba psicológica, confeccionada por el Centro de Desarrollo de Tecnologías de Inclusión UC, que permite captar la inteligencia general de las personas, es decir, la capacidad de conceptualizar, simbolizar, planificar, comprender las complejidades del entorno. M10 posee una duración límite de 10 minutos, tiempo en que el encuestado debe intentar responder 34 preguntas, distribuidas en 28 ítems. Cada respuesta correcta se contabiliza como 1 punto, mientras que aquellas preguntas que sean abordadas de manera incorrecta o sean omitidas no se les asigna puntaje. Luego, el puntaje total obtenido por el encuestado se traduce en un indicador absoluto de inteligencia general que, para efectos de esta investigación, se denomina *PSI*.

Por otro lado, Hyperpath es una evaluación producida exclusivamente para desarrollar los objetivos del presente estudio, la cual contiene preguntas de tres tipos: i) socioeconómicas (*PS*); ii) de Preferencias Reveladas (*PPR*); y iii) de Preferencias Declaradas (*PPD*).

Las *PS* son preguntas que proporcionan los aspectos socioeconómicos del encuestado, por lo que a él se le interroga por su edad, sexo, nivel de educación y de ingreso, y su ocupación.

En tanto, las *PPR* son interrogantes que permiten observar el comportamiento real del encuestado al interior del transporte público, captando sus restricciones individuales. Específicamente, estas se encuentran orientadas a revelar detalles respecto al viaje que el encuestado realiza con más frecuencia en la actualidad durante la semana en el sentido de ida.

Entre las *PPR* que incluye Hyperpath, al encuestado se le pregunta: “¿utiliza una o más veces en la semana el transporte público en su viaje?”. En caso de responder “sí”, luego se le interroga: “¿qué tipo(s) de transporte público utiliza en su viaje?”. Las opciones disponibles son: “Metro”; “bus de Transantiago”; “bus interurbano”; “taxi colectivo”; “otro”. De igual modo, también se le interroga: “aproximadamente, ¿cuánto tiempo toma su viaje?”. Las alternativas que se pueden escoger son: “menos de 20 minutos”; “20 minutos”; “30 minutos”; “40 minutos”; “50 minutos”; “60 minutos”; “más de 60 minutos”.

Por último, las *PPD* son preguntas que posibilitan captar el comportamiento de los encuestados sobre las *RHTP*. En ese sentido, antes de elaborar las *PPD*, fue necesario construir las *RHTP*.

Las *RHTP* fueron diseñadas con la finalidad de que los encuestados pudieran utilizar *IT*, *LC* o *HY* para viajar en un par O-D, bajo las siguientes suposiciones:

1. Un bus de una línea cualquiera transita entre sus respectivos nodos con un tiempo de viaje a bordo del vehículo determinístico y conocido.
2. El arribo de los buses sobre un nodo cualquiera sigue una distribución Poisson, es decir, los *headways* entre los buses distribuyen Exponencial. Por tanto, los usuarios esperan, en promedio, el *headway* completo.
3. No existe congestión en la *RHTP*.

De esta manera, si una persona desea abordar una línea de buses en particular, enfrentará un tiempo determinístico de viaje a bordo del vehículo (t_{v-det}), y un tiempo promedio de espera (t_{e-prom}), tal que $f = \left(\frac{60}{t_{e-prom}} \right)$ [1/min].

Así también, las *RHTP* fueron configuradas con distintos niveles de dificultad, complejidad que recae en el nivel de información que se le presenta a la persona, lo cual se traduce en dos ámbitos al interior de la *RHTP*: el número de nodos, y la cantidad de líneas de buses sobre las cuales es posible viajar. Esto se realizó con el objetivo de estudiar si la capacidad de minimizar el *TETV* disminuye a medida se complejiza la *RHTP*.

Además, las *RHTP* fueron elaboradas de tal manera que se ajusten a las restricciones personales de cada encuestado. Para llevar a cabo esto, las *RHTP* fueron pivotadas temporalmente a partir de la *PPR* “aproximadamente, ¿cuánto tiempo toma su viaje?”. En ese sentido, el t_{v-det} del *IT* mínimo de cada *RHTP* se ajustó a 5 posibles valores: 20, 30, 40, 50 y 60 minutos. Así, aquellos que respondan que su viaje dura 20, 30, 40, 50 o 60 minutos, se enfrentan a una red en la cual el *IT* mínimo tenga tal duración del t_{v-det} . Mientras tanto, quienes respondan que viajan menos de 20 minutos, deben responder la versión de 20 minutos. Por otro lado, aquellos que mencionen que viajan más de 60 minutos, responden la versión de 60 minutos.

En base a esta modelación, se construyeron 8 *RHTP* que integran Hyperpath. Dos de estas poseen 2 nodos (0x0), tres se componen de 3 nodos (1x0), y tres tienen 4 nodos (1x1). Cada tipo de *RHTP* de igual cantidad de nodos se distingue por la letra A, B o C. No se agregaron más *RHTP*, puesto que hacerlo implicaría elevar la carga cognitiva de la persona, por lo que su cansancio podría sesgar la medición. A modo de ejemplo, estas se exponen a continuación considerando el pivote temporal

de 30 minutos. Cada flecha representa el sentido de una línea de buses, y se les asocian un t_{v-det} y un t_{e-prom} expresados en minutos: $(t_{v-det} ; t_{e-prom})$. Los paraderos que atiende cada línea se simbolizan con un nodo.

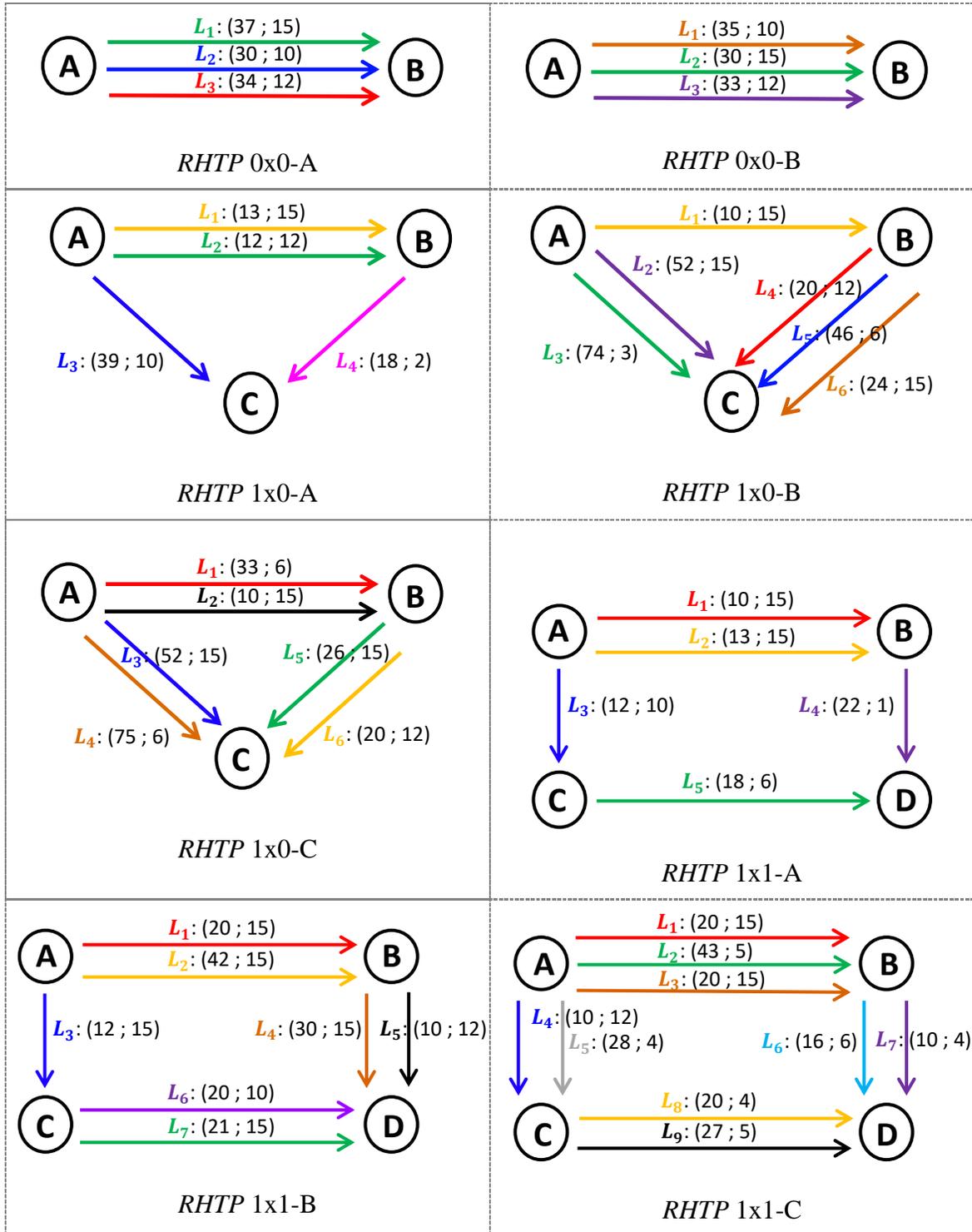


Ilustración 5 RHTP de Hyperpath

A partir de tales *RHTP* se formularon 14 *PPD*; cada una de estas tiene relación con escoger, desde un nodo en particular *W*, una combinación de líneas de buses con el objetivo de llegar al nodo final *Y* de la *RHTP*. Para efectos de notación, a continuación, tales *PPD* se codifican como $P^{W \rightarrow Y}$.

Tabla 1 Distribución de las *PPD* según *RHTP* de Hyperpath

<i>RHTP</i>	<i>PPD</i>						
0x0	$P_{0x0-A}^{A \rightarrow B}$			$P_{0x0-B}^{A \rightarrow B}$			
1x0	$P_{1x0-A}^{A \rightarrow B}$	$P_{1x0-B}^{A \rightarrow C}$	$P_{1x0-B}^{B \rightarrow C}$	$P_{1x0-C}^{A \rightarrow C}$	$P_{1x0-C}^{B \rightarrow C}$		
1x1	$P_{1x1-A}^{A \rightarrow D}$	$P_{1x1-B}^{A \rightarrow D}$	$P_{1x1-B}^{B \rightarrow D}$	$P_{1x1-B}^{C \rightarrow D}$	$P_{1x1-C}^{A \rightarrow D}$	$P_{1x1-C}^{B \rightarrow D}$	$P_{1x1-C}^{C \rightarrow D}$

Cabe destacar que las *PPD* fueron planteadas de modo que, desde el punto de vista del encuestado, exista independencia entre estas. Así también, las *PPD* fueron formuladas para que den la posibilidad de usar una, dos o más líneas para llegar al destino. Esto se ejemplifica en la Ilustración 6.

Supón que tu objetivo es llegar al paradero C, y cuentas con la siguiente información:

Línea	t_{v-det}	t_{e-prom}	f
L_1	10	5	12
L_2	21	2	30
L_3	26	15	4
L_4	10	10	6
L_5	12	12	5

Si tu objetivo es llegar a C, ¿qué línea(s) utilizarías en A? Puedes marcar más de una opción.

L_1

L_2

L_3

(Esta pregunta es independiente a la anterior)

Si tu objetivo es llegar a C, ¿qué línea(s) utilizarías en B? Puedes marcar más de una opción.

L_4

L_5

Ilustración 6 Ejemplo de *PPD*

Las *PPD* fueron configuradas con el objetivo de estudiar la alternativa de viaje que eligen los encuestados para viajar en una situación de elección de alternativas de viaje (o simplemente, situación de viaje). Para efectos de notación, a continuación, se codifica como $S^{W \rightarrow Y}$ una situación de viaje dada por un nodo inicial W y un nodo final Y . Por ejemplo, a partir de la *RHTP* de la Ilustración 6, es posible analizar: i) $S^{A \rightarrow C}$ juntando $P^{A \rightarrow C}$ y $P^{B \rightarrow C}$, y ii) $S^{B \rightarrow C}$ desde $P^{B \rightarrow C}$. En el caso de $S^{A \rightarrow C}$, la situación de viaje involucra 3 nodos (A, B y C), mientras que $S^{B \rightarrow C}$ integra únicamente 2 nodos (B y C).

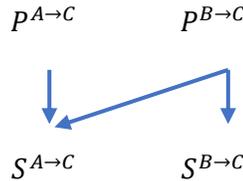


Ilustración 7 Ejemplo de *PPD* - situaciones de viaje

De esta manera, si con el objetivo de llegar a C, un encuestado considera como atractivas las líneas L_1 y L_3 en $P^{A \rightarrow C}$, y usa la línea L_4 en $P^{B \rightarrow C}$, entonces se desprende que él utiliza:

- *HY* en $S^{A \rightarrow C}$: $(A - L_1 - B - L_4 - C) / (A - L_3 - C)$
- *IT* en $S^{B \rightarrow C}$: $B - L_4 - C$

Por otro lado, si el encuestado selecciona únicamente las líneas L_3 en $P^{A \rightarrow C}$ y L_4 en $P^{B \rightarrow C}$, entonces él utiliza:

- *IT* en $S^{A \rightarrow C}$: $A - L_3 - C$
- *IT* en $S^{B \rightarrow C}$: $B - L_4 - C$

En ese sentido, nuevamente cabe resaltar el hecho de que, desde el punto de vista del encuestado, exista independencia entre las *PPD*. Por ejemplo, si al encuestado no se le indica tal instrucción en la Ilustración 6, potencialmente se le estaría obligando a escoger L_1 y/o L_2 para responder $P^{B \rightarrow C}$, lo cual sesgaría la medición de $S^{A \rightarrow C}$. Por otro lado, esta instrucción de independencia permite analizar pulcramente $S^{B \rightarrow C}$ cuando el encuestado no escoge ni L_1 ni L_2 en $P^{A \rightarrow C}$.

Así, a partir de las 14 *PPD* que integran Hyperpath se obtuvieron 14 situaciones de viaje, las cuales se disponen en la Ilustración 8. Estas 14 situaciones de viaje $S^{W \rightarrow Y}$ se categorizaron utilizando la notación $S2N$, $S3N$ y $S4N$ cuando involucran 2, 3 y 4 nodos, respectivamente.

Para finalizar, cabe mencionar dos limitaciones de la investigación relacionadas a la construcción de las *RHTP* y a la formulación de las *PPD*. Por una parte, las *RHTP* fueron diseñadas para analizar el comportamiento de los encuestados bajo circunstancias uniformes en términos de t_{e-prom} . Por tanto, la variación del t_{v-det} fue la única herramienta utilizada como pivote temporal para adecuar las *RHTP* (y, por ende, las *PPD*) según las restricciones personales de cada participante. En consecuencia, puede suceder que las *RHTP* no se adecúen completamente al contexto del encuestado, a pesar de utilizar las variaciones de t_{v-det} como pivotes. Por otro lado, las *RHTP* se construyeron controlando los factores no medibles y/o no tangibles que inciden en las alternativas de viajes utilizadas por las personas en la realidad. Por ejemplo, elementos como la comodidad, la accesibilidad y la seguridad no fueron incluidos en la modelación. Tal situación también representa

otra limitación del estudio, puesto que tales factores fueron manejados externamente a criterio del modelador.

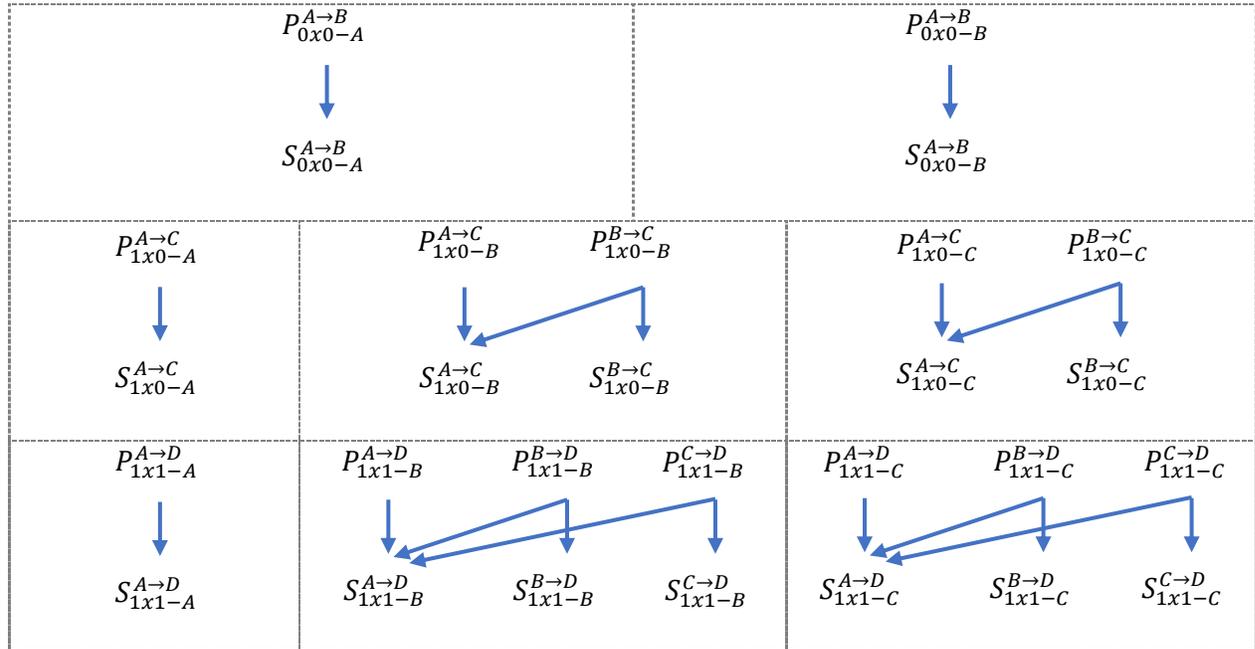


Ilustración 8 Distribución de las situaciones de viaje según RHTP

Tabla 2 Situaciones de viaje categorizadas según cantidad de nodos

	RHTP 0x0		RHTP 1x0			RHTP 1x1			
S2N	$S_{0x0-A}^{A \rightarrow B}$	$S_{0x0-B}^{A \rightarrow B}$	$S_{1x0-B}^{B \rightarrow C}$	$S_{1x0-C}^{B \rightarrow C}$	$S_{1x1-B}^{B \rightarrow D}$	$S_{1x1-B}^{C \rightarrow D}$	$S_{1x1-C}^{B \rightarrow D}$	$S_{1x1-C}^{C \rightarrow D}$	
S3N	-	-	$S_{1x0-A}^{A \rightarrow C}$	$S_{1x0-B}^{A \rightarrow C}$	$S_{1x0-C}^{A \rightarrow C}$	-			
S4N	-	-	-			$S_{1x1-A}^{A \rightarrow D}$	$S_{1x1-B}^{A \rightarrow D}$	$S_{1x1-C}^{A \rightarrow D}$	

4. APLICACIÓN DE LA ENCUESTA

Para llevar a cabo la aplicación de la encuesta, en primer lugar, se delimitaron las características de la muestra objetivo (i.e. los requisitos para participar en la encuesta):

1. Tener una edad igual o mayor a 18 años.
2. Residir en Santiago, o al menos realizar frecuentemente viajes dentro de la capital.
3. Conocer el sistema de transporte público Transantiago.
4. Haber utilizado cualquier modo de transporte público dentro del último mes (Metro, bus de Transantiago, bus interurbano, taxi colectivo, etc.).
5. No presentar daltonismo u otra afección a la vista, puesto que las líneas de buses de las RHTP de Hyperpath se construyeron por medio de distintos colores.

Posteriormente se estimó el tamaño muestral requerido para aplicar la encuesta. Para esto, se utilizó la fórmula propuesta por Smith (1979):

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{d^2} \quad (1)$$

n	: Tamaño muestral.
Z_{α}	: Valor de la variable Normal estandarizada para un nivel de confianza $(1 - \alpha)$.
d	: Margen de error.
p	: Proporción esperada.

Para estimar el tamaño muestral, se asumió que cada persona encuestada corresponde a 1 observación, independientemente de la cantidad de alternativas de viaje que seleccione. Así, considerando un 90% de confianza ($Z_{\alpha} = 1,64$), $d = 5\%$, p y $q = 50\%$ (puesto que no se conoce cuál es la probabilidad de ocurrencia de que una persona sea capaz de minimizar su *TETV*), entonces el tamaño muestral requerido es $n \approx 269$ personas u observaciones.

Por tanto, con el fin de cumplir aquel criterio, en el mes de octubre de 2018 se encuestaron a 300 usuarios de transporte público de Santiago.

Posteriormente, la base de datos primaria (*BDP*) generada a partir de la aplicación de la encuesta fue calibrada utilizando:

- Censo del año 2017 (INE, 2017a).
- Encuesta Suplementaria de Ingreso 2017 (*ESI*) (INE, 2017b).
- Encuesta Origen Destino 2012 (*EOD*) (SECTRA, 2014).

Específicamente, se utilizó el Censo para validar la distribución muestral de la *ESI*, comparando la distribución etaria por medio de un test chi-cuadrado. Luego, se validó la *EOD* a partir de la *ESI* comparando la distribución marginal de los rangos etarios y de ingreso por medio de otro test chi-cuadrado. Tras validar la *EOD*, fue filtrada con el objetivo de encontrar la porción de esa muestra que posee características similares a la *BDP*. Posteriormente, con esos datos se recalibró la *BDP*, estimando factores de corrección que permitieran rectificar las observaciones obtenidas en la encuesta. Para esto, se utilizó el método de Furness (1965) con la finalidad de reajustar la *BDP* según las distribuciones marginales de los rangos etarios y de ingreso de la *EOD*.

Como resultado se obtuvo una base de datos consolidada, en la cual:

- 54,48% corresponde al sexo femenino; 45,52% al sexo masculino.
- 42,92% posee entre 18-34 años; 41,44% entre 35-59 años; y 15,64% 60-más años.
- 58,21% son trabajadores; 22,20% estudiantes; 9,49% jubilados(as); 6,46% dueños(as) de casa; y 3,64% cesantes.
- 43,74% posee ingresos bajos (menor a \$300.001); 46,12% ingresos medios (\$300.001-\$800.000); y 10,14% ingresos altos (mayor a \$800.000).
- 45,18% cuenta con estudios universitarios o postgrado; 28,68% con estudios técnicos superiores; y 26,14% no tiene algún tipo de estudio superior.

- Un tercio de la muestra (34,54%) obtuvo un puntaje menor o igual a 17 *PSI*; el segundo tercio de la muestra (32,78%) posee un puntaje entre 18-22 *PSI*; y el tercer tercio de la muestra (32,68%) lo componen aquellos que poseen un puntaje igual o mayor a 23 *PSI*.
- 94,53% utiliza una o más veces el transporte público en su viaje. De estos, 72,74% usa Metro; 75,32% bus de Transantiago; 10,15% taxi colectivo; 8,05% bus interurbano; y 7,75% otro modo de transporte público.
- 8,26% posee un viaje que toma menos de 20 minutos; 10,58% de 20 minutos; 20,00% de 30 minutos; 23,17% de 40 minutos; 10,83% de 50 minutos; 16,03% de 60 minutos; y 11,13% de más de 60 minutos.

Por último, considerando que cada alternativa de viaje seleccionada por un encuestado corresponde a una observación distinta, entonces el 72,42% de los casos se utilizan *IT*; 17,84% *LC*; y 9,74% *HY*. Esta información se desagrega de la siguiente forma:

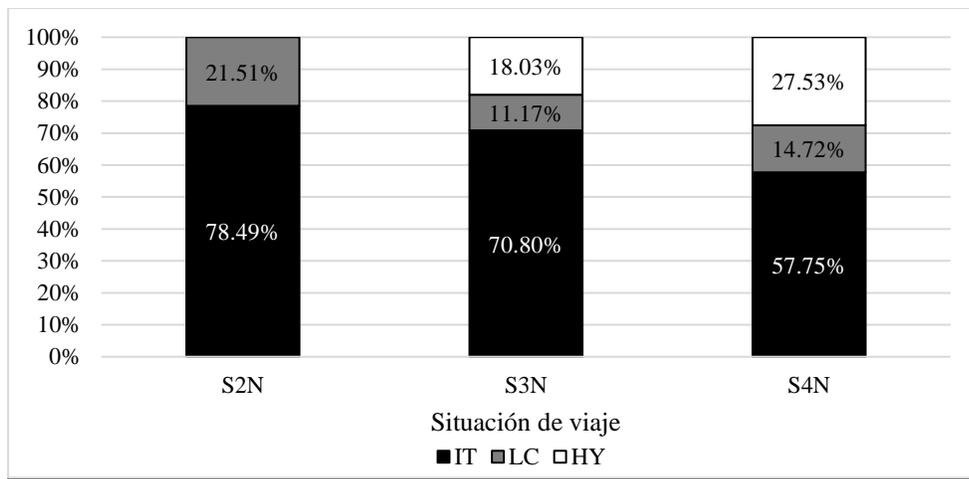


Ilustración 9 Alternativas de viaje vs situaciones de viaje

De acuerdo con la Ilustración 9, la proporción de observaciones que utilizan *IT* es decreciente a medida que aumenta la cantidad de nodos involucrados en la situación de viaje. Mientras tanto, la proporción de observaciones que usan *LC* y *HY* crece de *S3N* a *S4N*.

5. MODELACIÓN

Para determinar si los encuestados minimizan su *TETV* al interior de 8 *RHTP*, en primer lugar, se generó un modelo Logit de Nidos Cruzados (*CNL*) con la finalidad de estimar las valoraciones del t_{e-prom} , y del costo t_r de realizar un transbordo, respecto al t_{v-det} . Se utilizó dicha modelación, puesto que permite correlacionar las alternativas de viaje que comparten líneas de buses. De acuerdo de los resultados obtenidos, del modelo *CNL* se desprenden las siguientes valoraciones:

- t_{e-prom} : 1,32 min espera/min viaje
- t_r : 16,73 transbordo/min viaje

Luego, a partir de tales valoraciones se procedió a estimar qué proporción de las observaciones (i.e. alternativas seleccionadas por los encuestados) minimizan el *TETV* utilizando:

- Alternativa óptima de viaje: Alternativa que posee menor *TETV* en relación al resto.
- Alternativa eficiente de viaje: Alternativa subóptima que posee un *TETV* cercano al óptimo.

Tal cercanía al óptimo o “rango de eficiencia” fue modelada por medio de una brecha absoluta de tiempo (*BAT*). Esta indica qué tan cercano es el *TETV* de una alternativa eficiente de viaje con respecto al *TETV* de la alternativa óptima de viaje en términos absolutos, expresados en la notación sexagesimal de minutos ($'$). Por ejemplo, si la alternativa óptima posee un *TETV* de 30 minutos, y se asume que $BAT=3'$, entonces se consideran como eficientes aquellas alternativas que posean un *TETV* a lo más 3 minutos respecto al *TETV* óptimo. Asimismo, si el *TETV* óptimo es 20 minutos, y se asume que $BAT=3'$, entonces nuevamente serán catalogadas como eficientes aquellas alternativas que posean a lo más una duración de 3 minutos respecto al *TETV* óptimo.

Bajo este contexto, se utilizó *BAT* para estudiar qué proporción de personas utilizan alternativas óptimas ($BAT = 0'$) y eficientes ($BAT > 0'$) de viaje. Así, se obtuvo la Ilustración 10, la cual muestra la evolución de las proporciones de las observaciones *S2N*, asociadas a los 5 pivotes temporales (20, 30, 40, 50 y 60 minutos), que minimizan su *TETV* a medida que crece el *BAT*.

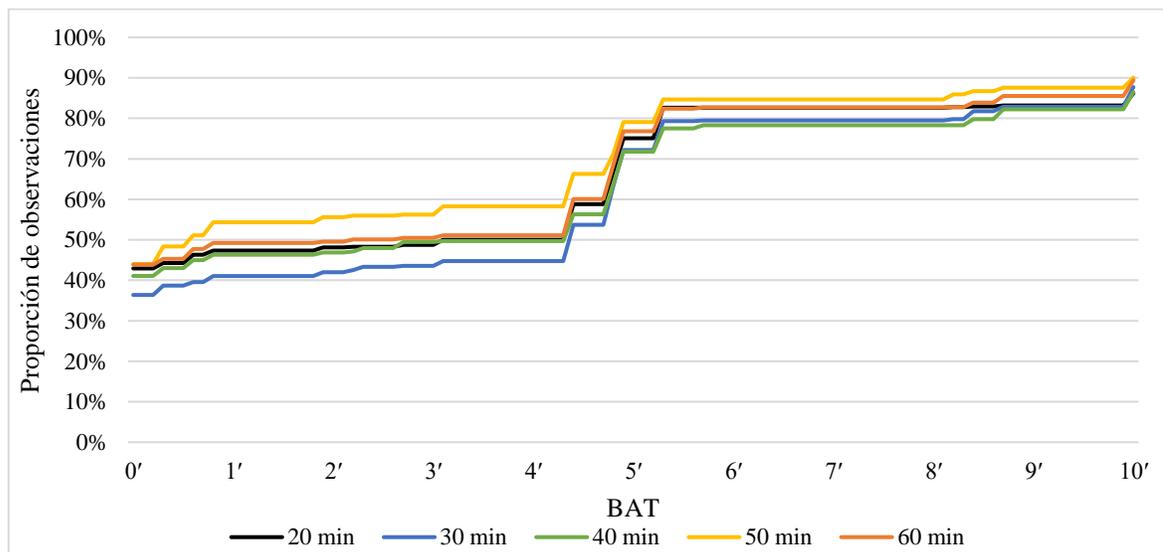


Ilustración 10 Capacidad de minimizar el *TETV* variando *BAT* para *S2N*

De acuerdo a la Ilustración 10, la dispersión de las observaciones con distintos pivotes temporales tienden a converger para $BAT \geq 5'$. Es más, el coeficiente de variación del comportamiento de las observaciones es menor a 5% para tal valor de *BAT*.

Este análisis fue replicado para las observaciones *S3N* y *S4N*. En tales casos, se registró un comportamiento similar de las observaciones; para $BAT \geq 2,2'$, el coeficiente de variación de *S2N* y *S3N* es menor a 20%, y para $BAT \geq 6,9'$ el coeficiente de variación de *S3N* es menor a 5%. Por tanto, el rango de eficiencia *BAT* permitió analizar el comportamiento de las observaciones de manera robusta (pseudo independiente del tipo de pivote temporal).

En virtud de ello, en la Ilustración 11 se graficó la evolución promedio de las observaciones que minimizan su *TETV* a medida que crece el *BAT*. Esto, diferenciando por situación de viaje.

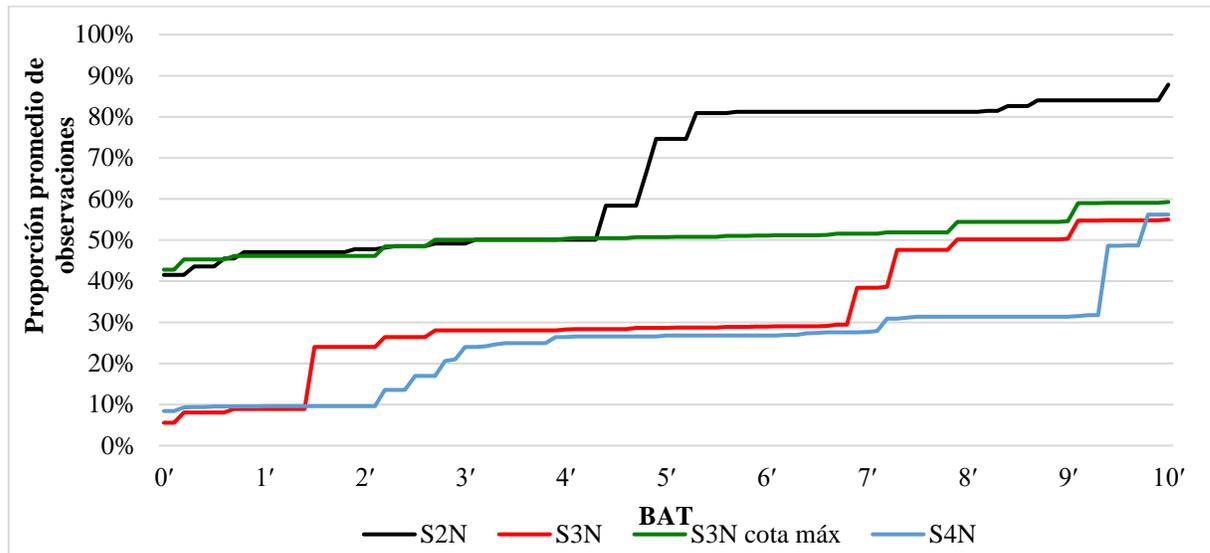


Ilustración 11 Capacidad promedio de minimizar el *TETV* variando *BAT*

Cabe resaltar que Ilustración 11 incluye la curva “*S3N cota máx*”, la cual representa la proporción de las observaciones que minimizaron el *TETV* y/o no utilizaron el nodo intermedio como punto de transbordo. En ese sentido, es posible que dentro de la muestra existan personas que hayan preferido minimizar únicamente la cantidad de transbordos en vez de minimizar su *TETV*. Por tanto, no es posible conjeturar que dichas personas no sean capaces de minimizar su *TETV*. Más bien, tendrían otras prioridades para tomar una decisión.

Entonces, de la Ilustración 11 se analiza que las curvas “*S3N*” y “*S3N cota máx*” tienden a converger a medida que aumenta el *BAT*. Esto se debe a que algunas de las alternativas que no utilizan el nodo intermedio pasan a ser eficientes cuando *BAT* crece a un valor determinado. Además, se desprende que no todas las observaciones fueron capaces de minimizar su *TETV*, ni utilizando alternativas óptimas de viaje, ni eficientes o subóptimas de viaje, al menos dentro del intervalo 0'-10' de *BAT*. Asimismo, se visualiza que la proporción promedio de personas que minimiza su *TETV* utilizando alternativas eficientes de viaje disminuye a medida que aumenta la cantidad de nodos involucrados en las situaciones de viaje, independientemente del valor de *BAT* entre 0'-10'.

Posteriormente, para determinar qué factores socioeconómicos y cognitivos inciden sobre la capacidad de minimizar el *TETV*, se definió buscar un único valor dentro del rango de eficiencia *BAT* que permita ser utilizado como variable explicativa para modelar esta capacidad, esto a través de un modelo Logit Mixto (*ML*) de dos alternativas *i*: sí minimiza *TETV*; y no minimiza *TETV*. Se prefirió usar dicho modelo con la finalidad de captar la correlación de observaciones provenientes de un mismo individuo y la heterogeneidad en las preferencias.

La búsqueda de aquel único valor de *BAT* que permita describir de mejor manera los factores socioeconómicos y cognitivos que influyen en tal capacidad se realizó tomando en consideración los siguientes criterios: i) que el valor sea único y trasversal para *S2N*, *S3N* y *S4N*; y ii) que la

capacidad de minimización del *TETV* sea decreciente entre las situaciones de viaje *S2N*, *S3N* y *S4N*.

Luego, tras iterar sobre 46 modelos *ML* preliminares se obtuvo lo buscado: $BAT = 8'$ como valor deseado que cumple con los criterios mencionados. Esto se dispone en la Ilustración 12:

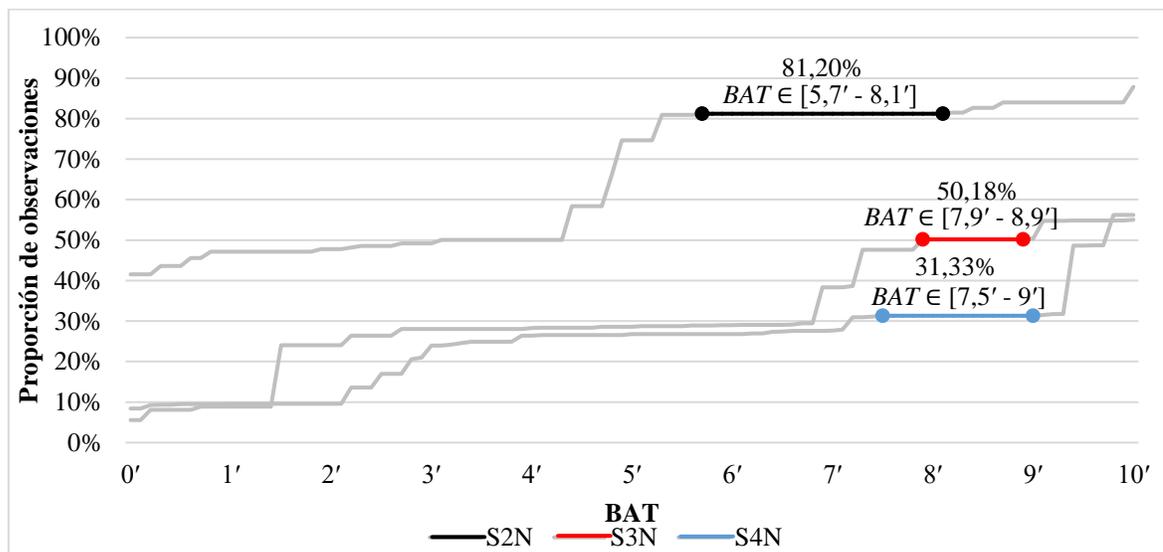


Ilustración 12 *BAT* seleccionados para generar el modelo *ML*

De acuerdo con la Ilustración 12, $BAT = 8'$ es un valor sobre el cual la capacidad (proporción de observaciones) de minimización del *TETV* es decreciente en términos de la complejidad de las situaciones de viaje *S2N*, *S3N* y *S4N*. Además, este valor entrega holgura para ser entendido como intervalos sobre el cual la capacidad de minimización no varía. Por ejemplo, la capacidad de minimizar el *TETV* sobre *S2N*, *S3N* y *S4N* con $BAT = 8'$ es idéntica versus si se considerara $BAT = 7'$ para *S2N*, $BAT = 8'$ para *S3N*, y $BAT = 9'$.

Tras definir la variable explicativa, se procedió a estimar nuevos modelos *ML* realizando variaciones a la función de utilidad sistemática. Para comparar los modelos, se hizo uso del análisis informal, del test-t y el test de razón de verosimilitud LR (ambos, al 10% de significancia). A partir de este procedimiento, se convergió a un modelo *ML* final que integró como variables explicativas factores socioeconómicos y del viaje más frecuente, además del puntaje *PSI* transformado a *PPSI*. Tales variables y parámetros se disponen en la Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente.

Las funciones de utilidad sistemática V_{iq} del modelo *ML* final se exponen en las Ecuaciones 2 y 3. Para estimar el modelo *ML* final se empleó *PythonBiogeme* utilizando 2.000 *draws* en cada iteración del algoritmo. Demoró 1,25 horas en converger, su log-verosimilitud es -2.151,312, y su ρ^2 es 0,798.

Tabla 3 Variables del modelo ML final

Variable	Significado
$PPSI_q$	Variable cuantitativa que indica el puntaje PSI de la observación dividido por el puntaje máximo de la evaluación M10 (i.e. $PSI/34$)
E_q	Variable cuantitativa que indica la edad de la observación
ED_q	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación cuenta con algún tipo de estudio universitario o postgrado; 0 en otro caso (categoría base)
IA_q	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación percibe un ingreso mayor a \$1.550.000; 0 en otro caso (categoría base)
BT_q	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación utiliza frecuentemente bus de Transantiago; 0 en otro caso (categoría base)
M_q	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación utiliza frecuentemente Metro; 0 en otro caso (categoría base)
TC_q	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación utiliza frecuentemente taxi colectivo; 0 en otro caso (categoría base)
δ_q^{S2N}	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación corresponde a la situación de viaje $S2N$; 0 en otro caso
δ_q^{S3N}	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación corresponde a la situación de viaje $S3N$; 0 en otro caso
δ_q^{S4N}	Variable binaria que indica toma valor 1 si la observación corresponde a la situación de viaje $S4N$; 0 en otro caso

Tabla 4 Parámetros estimados del modelo ML final

$\hat{\beta}$	Valor	Test-t / 0	$\hat{\beta}$	Valor	Test-t / 0
ASC_{SI}^{S2N}	3,62	3,76	β_{E-m}	-1,9	-1,95
ASC_{SI}^{S3N}	0,961	1,73	β_{E-s}	0,974	2,2
ASC_{SI}^{S4N}	0,0621	0,13	β_{ED}	0,522	3,94
β_{PPSI-m}	0 (fijo)	-	β_{IA}	0,507	1,69
β_{PPSI-s}	1,58	4,67	β_{BT}	0,248	1,94
γ_{PPSI}	0,868	2,18	β_M	0,241	1,82
			β_{TC}	-0,466	-2,34

Todos los parámetros estimados del modelo ML son estadísticamente distintos de 0 con una significancia de 10% (sin considerar las constantes específicas ASC_{SI}). La correlación de algunas estas variables se exponen en la Tabla 5.

$$\begin{aligned}
V_{SI,q} = & ASC_{SI}^{S2N} \cdot \delta_q^{S2N} + ASC_{SI}^{S3N} \cdot \delta_q^{S3N} + ASC_{SI}^{S4N} \cdot \delta_q^{S4N} \\
& + \beta_{ED} \cdot ED_q + \beta_{IA} \cdot IA_q + \beta_{BT} \cdot BT_q + \beta_M \cdot M_q + \beta_{TC} \cdot TC_q \\
& + exp(\overline{\beta_{PPSI}} + \sigma_{PPSI}^2 \cdot \xi) \cdot \frac{(PPSI)_q^{Y_{PPSI}-1}}{Y_{PPSI}} \\
& - exp(\overline{\beta_{Edad}} + \sigma_{Edad}^2 \cdot \xi) \cdot Ln(Edad_q)
\end{aligned} \tag{2}$$

$$V_{NO,q} = ASC_{NO} = 0 \tag{3}$$

Tabla 5 Test-t de correlación de las variables del modelo *ML* final

$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	Test-t
β_{PPSI-s}	β_{ED}	-3,36
β_{PPSI-s}	β_{IA}	-2,73
β_{PPSI-s}	β_{E-m}	-3,37
β_{PPSI-s}	β_{E-s}	-4,4
β_{IA}	β_{E-m}	-2,57
β_{IA}	β_{E-s}	-2,81
β_{ED}	β_{E-m}	-2,51
β_{ED}	β_{E-s}	-3,09
β_{ED}	β_{IA}	0,05

De acuerdo con los resultados obtenidos, la mayoría de las variables son estadísticamente distintas entre ellas, salvo en el caso de *ED* vs *IA*. No obstante, se decidió mantener estas variables en el modelo puesto ambas son estadísticamente distintas de 0, y sirven para caracterizar en dos maneras diferentes la muestra en términos de la interpretación de cada variable.

Bajo este contexto, del modelo *ML* final se desprende que la probabilidad de minimizar el *TETV* es mayor para aquellos que:

- Poseen estudios universitarios o postgrado (β_{ED}) con respecto a quienes no los tienen.
- Perciben un ingreso mayor a \$1.550.000 (β_{IA}) frente a los que reciben un ingreso menor.
- Viajan frecuentemente usando bus de Transantiago (β_{BT}) y/o Metro (β_M) en relación con quienes no lo hacen.
- No utilizan habitualmente taxi colectivo (β_{TC}) para viajar vs aquellos que ocupan tal modo.

Además, el modelo *ML* final indica que dicha probabilidad:

- Disminuye a medida que se eleva la edad bajo una transformación logarítmica.
- Aumenta a mayor puntaje *PPSI*.

En tales variables se captó heterogeneidad bajo una distribución Log-Normal.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados, se concluye que no todos los viajeros de transporte público de alta frecuencia poseen la capacidad de minimizar el *TETV*, ni utilizando alternativas óptimas ni subóptimas de viaje. Es más, dicha capacidad decae al aumentar el nivel de dificultad de las *RHTP*, y está relacionada con los factores socioeconómicos y cognitivos. Por tanto, la suposición que suele utilizar la literatura en torno a que los viajeros minimizan su *TETV* no es adecuada, puesto que el comportamiento de los encuestados no es estrictamente homogéneo, óptimo, ni complejo.

Cabe mencionar que esta conclusión posee cierta limitación. Específicamente, al haber utilizado un enfoque hipotético (*RHTP*) para desarrollar el estudio, es posible que los resultados obtenidos no sean totalmente replicables a la realidad. Ahora bien, al menos es posible argumentar que el enfoque hipotético entrega una cota máxima del comportamiento que se podría captar en la realidad. Por ejemplo, si las personas no son capaces de minimizar su *TETV* en una *RHTP*, entonces es razonable pensar que con menor probabilidad lo hagan cuando se enfrenten a una red real en la cual influyen factores externos como la congestión, la comodidad, la seguridad y la accesibilidad.

AGRADECIMIENTOS Este estudio fue financiado por el Proyecto Fondecyt 11170127.

REFERENCIAS

Chriqui, C. y Robillard, P. (1975) Common bus lines. *Transportation Science*, 9, 115-121.

De Cea, J. Fernandez, J.E. Dekock, V. Soto, A. y Friesz, T.L. (2003) ESTRAUS: a computer package for solving supply-demand equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes. Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Furness, K.P. (1965) Time function iteration. *Traffic Engineering and Control*, 7, 458-460.

Hildebrand, C. y Hörtn, S. (2014) A comparative study between Emme and Visum with respect to public transport assignment. MSc Thesis, Division of Communications and Transport Systems. Linköping University.

INE (2017a) Resultados Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago.

INE (2017b) Encuesta Suplementaria de Ingresos. Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago.

Ortúzar, J. de D. y Willumsen, L.G. (2011) *Modelling Transport*. John Wiley & Sons, Chichester.

Prato, C.G. (2009) Route choice modeling: past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling*, 2, 65-100.

Raveau, S. y Muñoz, J.C. (2014) Analyzing route choice strategies on transit network. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington D.C.

SECTRA. (2014) Actualización y recolección de información del sistema de transporte urbano, etapa IX. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Chile.

Smith, M.E. (1979) Design of small-sample home-interview travel surveys. Transportation Research Record, 701, 29-35.

Spiess, H. y Florian, M. (1989) Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. Transportation Research Part B: Methodological, 23, 83-102.