

I N S T I T U T O   D E   E C O N O M Í A



T E S I S   d e   M A G Í S T E R

**2016**

Restricción por Congestión y Pase Diario en Chile:  
Recuperando las Preferencias por Eficiencia y Distribución

**Felipe Sepúlveda**

[www.economia.puc.cl](http://www.economia.puc.cl)



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
INSTITUTO DE ECONOMIA  
MAGISTER EN ECONOMIA**

**TESIS DE GRADO  
MAGISTER EN ECONOMIA**

**Sepúlveda, Aránguiz, Felipe Andrés**

**Diciembre, 2016**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
INSTITUTO DE ECONOMIA  
MAGISTER EN ECONOMIA**

**Restricción por congestión y pase diario:  
Recuperando las preferencias por eficiencia y distribución**

**Felipe Andrés Sepúlveda Aránguiz**

Comisión

Juan-Pablo Montero  
Salvador Valdés

**Santiago, Diciembre de 2016**

# Restricción por Congestión y Pase Diario en Chile: Recuperando las preferencias por eficiencia y distribución

Felipe Sepúlveda\*

Pontificia Universidad Católica de Chile

Diciembre, 2016

## Resumen

El *trade-off* entre eficiencia y distribución, es parte importante de la discusión de cualquier política pública y, en economía de transporte, ha sido una consideración fundamental para decidir cuál es la mejor política a implementar para desincentivar el uso del automóvil en las grandes ciudades. En esa línea, este trabajo busca evaluar los efectos de la política de Restricción Vehicular y Pase Diario, propuesta por el profesor Carlos Daganzo y que será implementada, por primera vez, en Santiago de Chile durante 2017, en estas dos dimensiones. Para lograr esto, desarrollo un modelo de red vial, el cual cuenta con agentes heterogéneos, quienes definen sus viajes en un horizonte de planificación semanal. Cada agente puede optar por dos medios de transporte - público o privado - y está sujeto a la aplicación de la política por parte del Ejecutivo. Los datos que utilizo para mi modelo y su calibración provienen de la Encuesta Origen-Destino de Chile del año 2012 y de Sectra<sup>1</sup>. Los resultados principales sugieren que esta política, a un precio de pase diario de \$5.750 por período *peak* mañana y tarde, lograría un 25.7% de los beneficios alcanzables con la implementación de una tarificación vial (TV) pura, no obstante, logra un resultado significativamente menos regresivo que TV. Lo que sugiere que es posible rediseñar las tradicionales restricciones vehiculares para hacerse cargo, de mejor forma, tanto de la dimensión distributiva como de la eficiencia de la política. Asimismo, muestro que el esquema de recaudación que se utilice en el análisis de bienestar es clave para determinar cómo se distribuyen los beneficios de la política, lo que es consistente con la literatura previa que estudia el *trade-off* entre estas dos dimensiones.

---

\*Trabajo realizado en Seminario de Tesis de Magíster de Economía, Comisión de Microeconomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Economía. Me gustaría agradecer a Juan-Pablo Montero por su disposición y guía en el desarrollo de este trabajo. Agradezco también a Francisco Cabezón, Salvador Valdés y Hugo Silva por sus comentarios y aportes. Además, quiero agradecer a mi familia y amigos en general, en especial a Joaquín Fuenzalida, Alejandra Benítez, Jacinta Diestre, Carlos Muñoz y Bernardita Sepúlveda por su apoyo incondicional tanto en mi paso por la universidad como en la elaboración de la tesis. Finalmente, agradezco a Alan Thomas y su equipo de trabajo en Sectra, por su disposición y ayuda en el proceso de recolección de datos. Los errores y omisiones son de mi absoluta responsabilidad. Dudas y comentarios a fsepulveda@uc.cl.

<sup>1</sup>Secretaría de Planificación de Transporte, organismo perteneciente a la Subsecretaría de Transporte del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

# 1. Introducción

El problema de congestión vehicular en las grandes ciudades del mundo ha sido muy debatido en los círculos académicos y políticos desde la segunda mitad del siglo XX<sup>23</sup>. El incremento del parque automotor debido al mayor ingreso per cápita de sus habitantes y a la migración hacia las grandes urbes, sumado a la falta de planificación urbana e ineficiencia en el uso del espacio vial, ha obligado a los países a diseñar diversas políticas de desincentivo al uso del automóvil.

La congestión vehicular genera diversas externalidades. Por un lado, aumenta el tiempo de viaje de los automovilistas particulares y de los usuarios del transporte público, deteriorando fuertemente la calidad de vida de las personas. Por otro lado, ciudades congestionadas enfrentan mayores problemas de contaminación, ya que como los vehículos -privados y públicos- circulan más lento, los motores emiten más contaminantes. Debido a lo anterior, los actores políticos se han visto obligados a discutir recurrentemente sobre cuál es la medida óptima para solucionar este problema.

En la literatura económica, usualmente se ha argumentado a favor de la tarificación vial (TV) como la política óptima para eliminar la externalidad que provoca la congestión vehicular (Small y Verhoef, 2007; Tsekeris y Voß, 2009; Basso y Jara-Díaz, 2012; Basso y Silva, 2014). Esta política es considerada como *first-best*, puesto que logra que cada uno de los individuos pague exactamente el valor que produce de externalidad, de manera que estos internalicen el costo que le generan a la sociedad al circular en transporte privado. Luego, la recaudación se devuelve a la sociedad en forma de transferencias de suma alzada logrando un incremento en el bienestar social, que supera la disminución de excedente provocada por el cobro de la tarifa.

No obstante, este enfoque tiene ciertas debilidades y ha llevado a que la política no sea una solución factible para el problema de congestión en gran parte del mundo. En primer lugar, Basso y Jara-Díaz (2012) señalan que, en general, los estudios de esta política determinan que los cambios en el excedente del consumidor son peores para los individuos más pobres de la población, de modo que la política sería regresiva cuando no se considera el reciclaje del dinero recaudado. Esto lleva a que la política tenga cierto rechazo en el círculo político, y que el tema distributivo forme parte importante de la discusión pública. Es por esto que, recientemente se ha desarrollado una literatura que estudia cómo reciclar de la mejor forma posible los ingresos de la tarificación por congestión para que todos los grupos de la población queden mejor, es decir, lograr establecer una política óptima de Pareto<sup>4</sup>. Sin embargo, como discuto en el siguiente párrafo, esto puede no ser suficiente.

En segundo lugar, hay consideraciones fiscales que impiden que los ingresos recaudados sean redistribuidos a criterio del planificador central, lo que genera que las promesas de redistribución sean poco creíbles, y que las transferencias de suma alzada para fines específicos no sean un instrumento factible de redistribución.

---

<sup>2</sup>Las presiones para implementar una política de tarificación por congestión en Londres comenzaron a principios de 1960, luego de que los registros de nuevos autos en el Reino Unido incrementaran de 500.000 en 1958 a más de un millón en 1963, no obstante, diversos obstáculos evitaron su aplicación hasta principios del siglo XXI. Para más información ver Leape (2006).

<sup>3</sup>En 1975, Singapur implementa la primera política de tarificación por congestión, la cual se denominó *Area Licensing System* -o ALS-. Esta política consistía en cobrar una tarifa a todos los taxis y automóviles que entraran, en hora *peak*, a la zona central de la ciudad, llamada Central Business District (CBD). Para más información ver Phang y Toh (2004).

<sup>4</sup>Ver Kockelman y Kalmanje (2005) para una mayor discusión sobre el tema.

Palma et al. (2007) señalan que el *earmarking*, proceso en el cual se decide destinar parte de la recaudación tributaria para fines específicos, generalmente no es apoyado por los ministros de finanzas, pues genera restricciones a la política de gasto del gobierno y produce inflexibilidad en el presupuesto de la nación. Luego, la teoría normativa de finanzas públicas tiende a desaprobado este tipo de instrumentos. En línea con esto, en un reporte de la OECD, publicado en 2014, se señala que en muchos países de Latinoamérica no se asigna parte del presupuesto a fines específicos, o poseen un porcentaje muy bajo en esta categoría<sup>5</sup>. Normalmente, estas determinaciones están definidas por la constitución o leyes en cada país. Un ejemplo de lo anterior, es que en Chile está prohibida constitucionalmente la redistribución de ingresos de una política para fines específicos, salvo que se trate de defensa nacional, o desarrollo local o regional<sup>6</sup>. Una vez que es recolectado el pago del impuesto -en este caso el pase diario-, la recaudación pasa a formar parte del presupuesto total del Estado, y, por ende, la forma en cómo se gasta el dinero pasa a ser una decisión independiente de la política de transporte en marcha.

Evidencia de lo anterior, es que, en ciudades como Birmingham, Manchester, y Nueva York se han planteado propuestas de TV para desincentivar el uso del automóvil, pero finalmente han sido rechazadas por la ciudadanía. Historias exitosas de TV se han limitado solo a un pequeño conjunto de lugares, dentro de los cuales destacan Estocolmo, Londres, Milán, y Singapur.

Ante los problemas anteriormente mencionados, surge la idea de que las políticas públicas deben considerar la dimensión distributiva dentro de su diseño, y el análisis de su efecto final no debe descansar en lo que podría obtenerse mediante la aplicación de transferencias de suma alzada<sup>7</sup>. En esa línea, el profesor Carlos Daganzo de la Universidad de Berkeley realizó un reporte (Daganzo, 2000) donde desarrolla la idea de generar una política nueva, llamada restricción vehicular con pase diario (RVPD), que combine la eficiencia de la TV con las restricciones vehiculares (RV), dándole mayor énfasis a la dimensión distributiva en su diseño.

La idea central, es que se definen restricciones vehiculares “x” días de la semana para los distintos grupos de la población -se asume que cada grupo cuenta con la misma cantidad de individuos, y son definidos aleatoriamente-, de manera que todos los agentes de la población tengan la misma cantidad de días a la semana sin la posibilidad de circular en automóvil. La forma más sencilla de entender esto es que los restringidos cada día son los que poseen cierto dígito final en la patente del vehículo, con lo que, si cada dígito final se restringe un día de la semana, se estaría evitando que circule un 20 % de la población cada día; en cambio, si se restringen dos días a la semana, se evitaría que circule el 40 % de la población, y consecuentemente, para tres y cuatro días se estaría restringiendo el 60 % y 80 % de la población, respectivamente. Cinco días de restricción sería el análogo a tener TV. Sin embargo, y a diferencia de las RV tradicionales, en este caso las personas tienen la opción de pagar un pase diario (PD) que les permite evitar la restricción. Esto tiene como objetivo mantener el componente de eficiencia de la tarificación por congestión: los individuos que valoran mucho la realización del viaje mediante transporte privado deben pagar por la externalidad negativa que provocan en la red vial -cuando viajan un día de restricción-, de manera que su costo marginal privado

<sup>5</sup>Por un lado, Chile, Ecuador, El Salvador y Honduras tienen menos del 20 % del presupuesto asignado a fines específicos. Perú, por otro lado, no tiene porcentaje de su presupuesto destinado a fines específicos.

<sup>6</sup>Artículo 19, número 20, definido en la Constitución Política de Chile de 1980.

<sup>7</sup>Literatura relacionada a la “economía del bienestar” (Broome, 1999; Little 1950) plantea la imposibilidad de separar las consideraciones de eficiencia de las de equidad.

se iguale al costo marginal social.

Las RV, pese a que generalmente han sido mal evaluadas, por ejemplo, por sus incentivos al incremento del parque automotor (Eskeland y Feyzioglu, 1997; Davis, 2008; y Gallego, Montero y Salas (GMS), 2013), han tenido una amplia aceptación pública, y se han implementado en numerosos países a lo largo del mundo, principalmente en Latinoamérica -Bogotá, Ciudad de México, Medellín, Sao Paulo y Santiago de Chile- (Barahona, Gallego, y Montero (BGM), 2015)<sup>8</sup>. Esto sugiere que para el planificador central la consideración distributiva es sumamente relevante a la hora de implementar la política. Su característica principal -que afecta a toda la población de la misma forma-, lleva a que sea una política percibida como más “justa”, lo que le da mayor posibilidad de aprobación en el congreso que una que política como TV, que es percibida como regresiva. Uno de los beneficios de la aplicación de RVPD por sobre las RV tradicionales, sumado a la ya comprendida ganancia de eficiencia, es que, si el precio del PD no es suficientemente alto, se puede evitar el incentivo al aumento del parque automotor, ya que el pago del PD sería más conveniente que la compra de un vehículo nuevo.

Indudablemente, con la RVPD se pierde eficiencia en comparación con el caso de TV pura: todos los individuos pueden circular los días que no estén restringidos, independiente de la valoración que tengan por cada uno de sus viajes, por lo que, en equilibrio, se siguen realizando algunos viajes esporádicos que se eliminarían en un escenario de TV. Sin embargo, esto le da un componente distributivo a la política: las personas que no podrían pagar por circular en el caso de TV, siguen recibiendo los beneficios de transportarse en auto los días que no están restringidos y, por lo tanto, el beneficio de la política debería redistribuirse de forma más equitativa en los distintos grupos socioeconómicos que en el caso de TV. El hecho de que los agentes con mayores ingresos tengan mayor probabilidad de decidir usar transporte privado que los de estratos socioeconómicos más bajos, debido a su menor restricción presupuestaria, es algo que se mantiene en este esquema, pero es mucho menos relevante que cuando se aplica TV pura.

Si bien esta política -RVPD- se puede entender como un híbrido entre las tradicionales RV y tarificación por congestión -o TV-, no ha sido aplicada en ningún país del mundo, y la única propuesta en marcha se desarrolla en Chile, donde hay un proyecto de ley impulsado por el Ministerio de Transportes (MTT) que busca implementar una política de este tipo para el año 2017. Por esta razón, se desconocen los efectos de corto plazo que tendría su aplicación, lo cual es clave para determinar las implicancias de esta política en las dimensiones de eficiencia y distribución de los beneficios generados. Con esta investigación planeo dar respuesta a esa interrogante.

La discusión entre eficiencia y distribución no es propia de la economía de transporte, sino que se puede extender a muchos otros tópicos de políticas públicas. Hay consideraciones políticas, filosóficas y económicas que llevan a que, en una economía con agentes heterogéneos, la política deseable difiera del *first-best*. Un área que ha profundizado en esta discusión es la de energía y medioambiente. En las siguientes líneas reviso parte de lo que ha desarrollado esta literatura con el objetivo de enmarcar mejor la discusión que se tiene entre estas dos dimensiones y ver cómo se aplica para el problema de congestión vehicular estudiado en esta investigación.

---

<sup>8</sup>Para mayor información sobre RV ver GMS (2013), BGM (2015), y Paredes (2016).

Bento et al. (2009) estudian el impacto distribucional de los impuestos a la gasolina en U.S. bajo distintos enfoques de redistribución en la recaudación. Este estudio ayuda a formarse una idea de cómo diferentes formas de redistribuir la recaudación a los agentes producen distintos resultados de bienestar en la economía. En particular, hacen un análisis de bienestar bajo *flat recycling*, *income-based recycling*, y *VMT-based recycling*. El primero tiene como consecuencia un mayor bienestar para los más pobres -política progresiva-; el segundo tiene efecto en “forma de U”, es decir, que pierden más los de ingresos medios; y finalmente, en el tercero, todos tienen disminución de bienestar, pero los pobres son los que tienen menor pérdida de excedente. Finalmente, analiza el caso en que la recaudación de ingresos no es devuelta a los hogares de ninguna forma: en este caso la política es regresiva, opuesto al efecto que se obtiene del *flat recycling*. Por lo anterior, es claro que el impacto distribucional de la política difiere bajo el esquema de transferencias que se utilice y, por lo tanto, es algo que considero en el análisis de bienestar que realizo en esta investigación.

En la misma línea, Goulder (2013) estudia el *trade-off* entre eficiencia y equidad de la política de *cap-and-trade* para reducir las emisiones de carbono. Propone que, a pesar de que la alternativa más eficiente sería subastar todos los permisos de emisión y descontar de los ingresos las tasas de impuesto marginales, esto aumentaría desproporcionadamente el costo de vida de los hogares más pobres, donde los bienes intensivos en energía contaminante representan una parte importante del presupuesto. Es por esto que sugiere como alternativa la distribución de los ingresos del *cap-and-trade* en transferencias de suma alzada hacia los agentes. Sin embargo, esto tiene grandes problemas de eficiencia, ya que evita que la política permita el “*revenue-recycling effect*” -disminución de impuestos distorsionadores preexistentes- para aumentar el bienestar total. Por todo lo anterior, el autor propone que el diseño de una política híbrida lograría balancear las consideraciones distribucionales y de eficiencia de la política. Esto va en línea con la idea de Daganzo de crear una política híbrida entre TV y RV para considerar el aspecto distributivo de la política.

Considerando lo anterior, lo que hasta ahora no ha quedado claro es, en definitiva, qué hace a una política más distributiva que otra. Una línea de investigación trata de dar con esta respuesta para el caso de los impuestos a la energía. Una forma de atacar este problema es lo propuesto por Levinson (2016) quien hace curvas de Lorenz para identificar el porcentaje de impuestos que pagan los distintos tipos de individuos -separados por ingreso-. Básicamente lo que hace es comparar cómo disminuye el excedente para cada grupo de ingresos en los distintos escenarios de política. Así, se puede definir cuándo una política es más regresiva que otra, y, por ende, cuándo es más o menos distributiva. Un enfoque similar -pero sin realizar curvas de Lorenz-, es el utilizado por West (2004), quien separa a la población en deciles y calcula el impuesto pagado en relación al ingreso del grupo. Además, muestra el cambio en el excedente del consumidor de cada grupo, relativo a su ingreso. Bento et al. (2009) realizan un procedimiento similar para investigar el efecto distributivo de la regulación al combustible (CAFE) en U.S., analizando para cada cuartil de ingresos, cuál es el cambio de bienestar sobre el ingreso promedio de cada grupo.

El problema que tiene esta metodología es que es inútil para comparar distintas políticas que producen beneficios o desutilidad a grupos distintos. Por ejemplo, si la población está diferenciada en deciles, y, *ceteris paribus*, una política beneficia al segundo grupo de ingresos, y otra distinta, beneficia al primer y tercer grupo, pero empeora al segundo, es difícil discriminar cuál es más regresiva. Esto se traduce en que



las curvas de Lorenz de ambas políticas se cruzan y, por lo tanto, no se puede concluir qué distribución es más o menos equitativa. Finalmente, en un trabajo reciente realizado por Davis y Knittel (2016) los autores calculan un solo indicador para toda la distribución de ingresos: la pendiente del promedio del cambio de bienestar entre una política y otra -CAFE vs impuestos al carbono- de todos los grupos<sup>9</sup>. Este indicador puede ser útil en caso de que en mi estudio se produzcan ambigüedades para determinar qué política es más o menos distributiva que otra. No obstante, para ir en línea con lo desarrollado por el grueso de la literatura, en esta investigación he decidido apegarme a lo realizado por Bento et al. (2009), Levinson (2016) y West (2014) para realizar el análisis distribucional.

En ese sentido, el objetivo de mi tesis es realizar una evaluación de la política de RVPD en las dimensiones de eficiencia y distribución, y compararla con los casos polares de TV y RV, lo cual me entrega un margen de comprensión respecto de cuáles son los pesos que le da el planificador central a estas dimensiones a la hora de definir una política de descongestión vehicular. Para ello, desarrollo un modelo teórico que racionaliza los efectos de la RVPD en el corto plazo. En particular, desarrollo un modelo de red vial origen-destino sencillo, el cual cuenta con agentes heterogéneos, quienes definen sus viajes en un horizonte de planificación semanal. Cada agente puede optar por dos medios de transporte - público o privado - y está sujeto a la aplicación de la política por parte del Ejecutivo. Los datos con los que alimento mi modelo y calibro los parámetros relevantes provienen de la Encuesta Origen Destino (EOD) de Chile del año 2012 y de información proporcionada por la Secretaría de Planificación de Transporte del Ministerio de Transporte (Sectra).

La construcción de este modelo me permite contestar preguntas fundamentales respecto del efecto de la RVPD en la red vial. Por un lado, me permite determinar el precio óptimo del PD y la cantidad de días de restricción para cada dígito. Por otro lado, hace factible responder preguntas respecto al *trade-off* entre eficiencia y redistribución que puede lograr esta política en sus distintos escenarios de implementación, y su comparación con las políticas usadas a nivel mundial: restricción vehicular (caso Bogotá) y tarificación vial (caso Londres). Los *outcomes* que me permiten realizar este análisis son la congestión vehicular -medida como la partición modal de cada estrato socioeconómico y la partición modal agregada del sistema-, las velocidades de circulación del transporte privado y transporte público- y, finalmente, el bienestar social en los distintos escenarios de política.

Los resultados principales de esta investigación muestran que, para los legisladores, la distribución es algo fundamental a la hora de definir una política de desincentivo al uso del automóvil. Mientras una política como TV le entrega 100% del peso a la eficiencia -escenario *benchmark* de eficiencia-, una de RV pura (como sucede en Bogotá) le deja 0%<sup>10</sup> de peso a esta dimensión, y la política de RVPD, de un día, entrega solo un 25.7% de los beneficios que se podrían alcanzar en TV, a un precio de PD -promedio- de \$5.375 por período *peak* mañana y período *peak* tarde. Sin embargo, esta última política tiene un efecto distributivo importante, logrando que los individuos más pobres obtengan un bienestar significativamente mayor que bajo un escenario de TV. Esto confirma el hecho de que es posible rediseñar las tradicionales RV para lograr una política que se haga cargo tanto de la dimensión distributiva como de la eficiencia, sin descansar en transferencias de suma alzada como la única forma de distribuir los beneficios de la política. Asumiendo,

<sup>9</sup>La pendiente calcula la dirección del efecto -pendiente negativa corresponde a impuestos regresivos y pendientes positivas a impuestos progresivos- y la magnitud. Calculan la pendiente haciendo una regresión lineal para la medida de bienestar de cada decil, salvo cuando comparan con Bento et al. (2009) quienes hacen cuartiles, y Williams et al., (2015) que mide en quintiles.

<sup>10</sup>Se deja de percibir el 100% del bienestar alcanzable en un escenario de TV, e incluso existe pérdida de bienestar.

igualmente, que existen costos importantes en el grado de eficiencia que se puede alcanzar con la política<sup>11</sup>.

Otro de los resultados de esta investigación, es que el esquema de recaudación que se utiliza en el análisis de bienestar es clave para determinar cómo se distribuyen los beneficios de la política, en línea con lo encontrado por Bento et al. (2009). Previa a la redistribución de los beneficios, la RVPD es una política regresiva, pero aumenta su regresividad a medida que aumenta el número de días de restricción vehicular con PD -aumenta la pérdida de bienestar de los grupos más pobres y aumenta el bienestar de los más ricos-, poniendo al caso de TV como el más regresivo de todos -5 días a la semana de RVPD-. Sin embargo, si se considera la redistribución de la recaudación, existen esquemas que hacen que el resultado deje de ser regresivo.

En el esquema de *redistribución por asignación* (que explico en la sección 4) las simulaciones predicen que la política óptima es la de TV, la cual permite que un 64.23% de la población esté mejor que en el escenario de referencia, siendo los individuos perjudicados los que no poseen auto y pertenecen a los grupos socioeconómicos más pobres. En este caso, el precio que maximiza el bienestar social es de \$8.000 diarios, los cinco días de la semana, lo cual genera beneficio total de la política equivalente a un 1.19% del PIB nominal de Chile.

Por otro lado, bajo un esquema de *redistribución por transporte público*, la política óptima también es TV, pero esta vez con un precio de PD de \$6.500, lo cual produce un beneficio total equivalente al 1,36% del PIB nominal chileno. La gran diferencia entre los dos enfoques de redistribución es que, en este último, los individuos perjudicados son los pertenecientes a la clase media con auto, y no los más pobres como resulta en el primer caso, obteniéndose que un 61% de la población está mejor con esta política. El principal cambio es que los individuos de estratos más pobres enfrentan beneficios directos por el menor costo del transporte público producto de la redistribución de la recaudación, lo cual impacta de forma significativa en su bienestar. En este caso, la política más eficiente también logra el mejor resultado distributivo lo cual es el escenario ideal para el planificador en un contexto de implementación de política para descongestionar la red vial. Por lo tanto, la factibilidad de redistribuir el dinero recaudado con fines específicos, según el objetivo del planificador central, es una característica fundamental para el diseño de políticas públicas que consideren la distribución como uno de los resultados claves de la política.

Finalmente, algo clave en este sentido, es que una política de este tipo siempre tiene perdedores. Como he mostrado en los distintos esquemas anteriores, no es posible lograr una mejora *paretiana* con este diseño, que deje a todos mejor. Por lo tanto, pese a que es posible mejorar la distribución de los beneficios de la política, siempre habrá costos para algún grupo de la población.

El resto de la tesis se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 describo el modelo teórico, mostrando cómo son capturados los aspectos claves del problema. En la sección 3 describo los datos utilizados y los resultados de la calibración de mi modelo. En la sección 4 presento las simulaciones del modelo en los distintos escenarios de política, incluyendo análisis de bienestar y distribución. Finalmente, en la sección 5 expongo las principales conclusiones de la investigación.

---

<sup>11</sup>En RVPD, de un día, se pierde un 74.3% del beneficio total que se logra en TV.

## 2. El modelo

El modelo desarrollado en esta tesis está basado en una ciudad con red vial origen-destino (OD), la cual posee agentes heterogéneos, quienes definen sus viajes en un horizonte de planificación semanal. Cada agente puede optar por dos medios de transporte ( $m$ ) para cada día de la semana, público ( $b$ ) o privado ( $c$ ). La cantidad de días de la semana que eligen transporte privado se denota como  $d \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ . Los agentes son heterogéneos en cuatro dimensiones: preferencias intrínsecas por el modo de transporte ( $\theta_i$ ), valoración del tiempo ( $\gamma_i$ ), ingresos -o valoración monetaria- ( $\lambda_i$ ), y tenencia de automóvil ( $A \in \{0, 1\}$ ), donde  $\theta_i$ ,  $\gamma_i$ , y  $\lambda_i$  tienen una distribución conocida -que describo en la siguiente sección de la tesis-. El Gobierno define una tarifa de circulación diaria para el transporte privado  $P_c$  -que corresponde al PD-, y la cantidad de días que aplica la tarifa:  $r \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ . Además, define una tarifa de transporte público  $P_b$ , que corresponde al *ticket* de los buses.

### 2.1. Función de utilidad

La utilidad de un individuo del grupo  $i$  que escoge transporte privado  $d_i$  días de la semana, viene dada por:

$$U_i = \Omega_i(\theta_i, D_i, D_b) - \lambda_i \text{Costo}(d_i, P_c, P_b, r) - \gamma_i \text{Tiempo}(d_i, D_c, D_b)$$

La cuasilinealidad de la función, donde se separan los conceptos de preferencias modales, costos monetarios y tiempos de transporte son estándar en la literatura de transporte<sup>12</sup>. Este modelo tiene dos variaciones fundamentales respecto de lo que se observa en la literatura tradicional de transporte: el primero es la heterogeneidad en el parámetro de preferencias, el cual normalmente es una constante modal; segundo es el horizonte de planificación semanal de los agentes. El primer punto lo describo en profundidad en las siguientes líneas, mientras que el segundo lo incluyo para poder trabajar con las características específicas de la política de RVPD, donde la restricción vehicular puede ser un día a la semana o puede aumentar en todo el rango de días hasta llegar a cinco.

Un individuo que no tiene auto ( $A = 0$ ) está obligado a moverse en transporte público, por lo que, de alguna forma, este modelo supone que los viajes son esenciales y no se dejan de hacer. La única incógnita es el modo de transporte que deciden los individuos en esta red de transporte mixta. Asimismo, los individuos que no tienen auto se mantienen sin auto, ya que los efectos de la política son de corto plazo. En la calibración explico cómo asigno parámetros de preferencias, costo monetario, y tiempo a este grupo, lo cual es fundamental a la hora de maximizar la función de bienestar social de la economía. En este punto lo importante es entender que, en lo único que afectan los individuos que no tienen auto a quienes sí poseen, es en fijar una “base” para la cantidad demandada de transporte público y, por ende, para las particiones modales<sup>13</sup> de cada grupo de ingresos y la partición modal agregada.

Teniendo eso en consideración, procedo a explicar los parámetros y funciones de la utilidad de los agentes.  $\Omega_i$  es una combinación convexa de las preferencias intrínsecas que tienen los agentes por cada medio de transporte, las cuales son ponderadas por los parámetros  $(5 - d_i)$  y  $d_i$ . Estos últimos parámetros indican la

<sup>12</sup>Para más información ver Basso y Silva (2014), o Small y Verhoef (2007).

<sup>13</sup>Cantidad demandada de transporte público sobre la demanda total.

cantidad de días de la semana que el individuo elige viajar en transporte público y privado, respectivamente.  $Costo(d_i, P_c, P_b, r)$  es la función que determina el costo monetario promedio diario, y  $Tiempo(d_i, D_c, D_b)$  es la función que expresa el tiempo de viaje promedio diario.  $D_m$  indica la demanda agregada por cada modo de transporte  $m \in c, b$ , y entra en las funciones de preferencia y de tiempo, racionalizando la externalidad que genera la congestión cuando aumenta el flujo vehicular. Para propósitos de este estudio, asumo que la demanda total por viajes es constante y no cambia endógenamente con los parámetros del modelo. Esto puede ser cuestionado desde la óptica que considera el incentivo a la compra de un segundo vehículo; sin embargo, dado que los efectos analizados en este estudio son solo de corto plazo, donde es poco probable que los agentes adquieran un vehículo adicional, dejo esta dimensión al margen.

La función de preferencias promedio diaria, denotada por  $\Omega_i$  se define como:

$$\Omega(\theta_i, d_i, D_b) = \frac{1}{5} \cdot [(5 - d_i) \cdot Pref_b(\phi_1, D_b, n) + d_i \cdot Pref_c(\phi_0)]$$

Las funciones de preferencia por cada modo se pueden escribir como:

$$Pref_c(\phi_0) = \phi_0$$

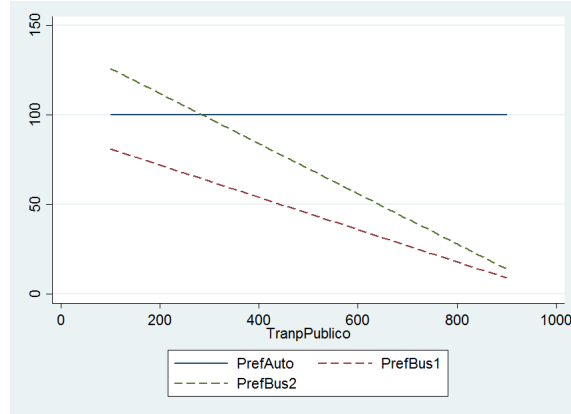
$$Pref_b(\phi_1, D_b, n) = \phi_{1i} - \epsilon \cdot \frac{D_b}{n}$$

Donde  $\phi_{1i} = \phi_0 \cdot \theta_i$ ,  $n$  es la cantidad de individuos en la red y  $\epsilon \in [0, 1]$  es un parámetro desconocido que es calibrado, e indica el impacto del uso del transporte público en la función de preferencias.  $\phi_0$  es una constante que normalizo a 1.

Estas funciones tratan de racionalizar el hecho de que, sin considerar el costo monetario y el costo en tiempo, la utilidad intrínseca de viajar en transporte público es decreciente en la cantidad de individuos que deciden viajar en bus, mientras que la preferencia -o comodidad- derivada de circular en transporte privado es constante en esa variable y también en la demanda por transporte privado. Esto también refleja que la comodidad del transporte público es decreciente en la cantidad de gente que lo usa. A un nivel alto de saturación de los buses, la gente comienza a sentirse incómoda y, por ende, disminuye su preferencias intrínseca por viajar en este medio. Por otro lado, esto no sucede con el transporte privado. Una persona adicional que decida viajar en auto no se suma al auto de otro individuo, por lo que no afecta su comodidad, solo la velocidad que está capturada en la función de tiempo.

Lo anterior permite que el modelo tenga cierta flexibilidad respecto de las preferencias de los individuos. Podemos observar individuos que *ex-ante* siempre prefieren circular en transporte privado (ver línea azul en Figura 1). También podemos contar con individuos que siempre prefieren transporte público. O también podemos encontrar individuos que, a una baja saturación del transporte público, su preferencia por este medio es mayor que por transporte privado, pero que, a un determinado nivel de saturación, esta preferencia se revierte (ver línea roja en el Figura 1).

Figura 1: Preferencia por modo a distinto nivel de demanda de transporte público.



## 2.2. Función de costo monetario

El costo monetario promedio diario se calcula de la siguiente forma:

$$Costo(d_i, P_c, r) = \frac{1}{5} \cdot [(5 - d_i) \cdot P_b + Costo_c(d_i, r, P_c)]$$

Donde  $P_b$  es la tarifa diaria del transporte público y  $Costo_c$  es el costo monetario del transporte privado que aumenta con el precio del PD y cambia de acuerdo a la combinación entre la cantidad de días de restricción vehicular y la cantidad de días que el individuo desea utilizar transporte privado. Por ejemplo, un individuo que desea viajar en transporte privado tres días a la semana y enfrenta una restricción de un día no debería tener efectos en su planificación de viajes semanal ni en el costo monetario, pues sustituyendo entre días puede fácilmente sacarse la restricción y no pagar el PD. No obstante, un agente que tiene como objetivo viajar los cinco días de la semana y enfrenta una RVPD se encuentra obligado a cambiar su planificación semanal y pagar el PD los días que circule en transporte privado.

Asumiendo perfecta sustitución de viajes entre días de la semana, al imponerse una restricción de  $r$  días, el costo de un individuo que viaja en transporte privado  $d_i$  días de la semana se calcula de acuerdo a la siguiente matriz:

Cuadro 1: Matriz que indica la cantidad de PD que paga el individuo  $i$  en la semana.

		Pago del Pase Diario					
		Número de días de la semana que usa transporte privado ( $d_i$ )					
Días de restricción ( $r$ )		0	1	2	3	4	5
0		No paga	No paga	No paga	No paga	No paga	No paga
1		No paga	No paga	No paga	No paga	No paga	Paga 1
2		No paga	No paga	No paga	No paga	Paga 1	Paga 2
3		No paga	No paga	No paga	Paga 1	Paga 2	Paga 3
4		No paga	No paga	Paga 1	Paga 2	Paga 3	Paga 4
5		No paga	Paga 1	Paga 2	Paga 3	Paga 4	Paga 5

La matriz anterior se puede traducir en la siguiente fórmula matemática:

$$Costo_c(d_i, r, t_c) = d_i \cdot c_0 + P_c \cdot \text{máx}\{0, d_i + r - 5\}$$

Donde  $c_0$  es el costo operacional diario de transportarse en auto - se considera bencina, lubricantes, etc.-, y la función “máximo” racionaliza la sustitución perfecta de viajes entre los distintos días de la semana.

### 2.3. Función de tiempo

El tiempo diario promedio en que incurre un agente en una semana de viajes se puede definir de la siguiente forma:

$$Tiempo(d_i, D_c, D_b) = \frac{1}{5} \cdot [(5 - d_i) \cdot Tiempo_{tp} + d_i \cdot Tiempo_c]$$

Donde la función  $Tiempo_b$ , con  $m \in \{c, b\}$  es modelada como una función BPR( $\alpha, \beta$ ), usual en modelos de transporte (ver Basso y Silva (2014)):

$$Tiempo_m = f_m \cdot \left( 1 + \alpha_m \cdot \left( \frac{freq_b \cdot \kappa + \frac{D_c \cdot l}{a \cdot K}}{C} \right)^{\beta_m} \right)$$

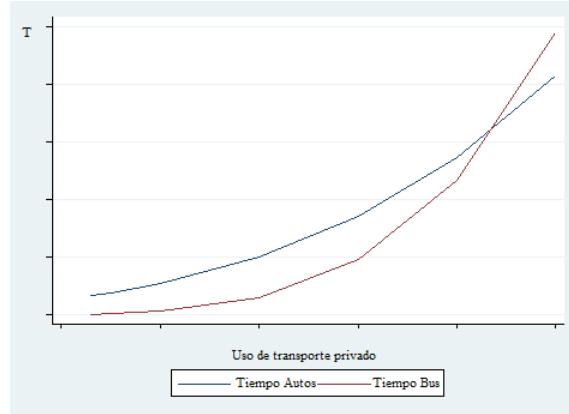
Donde  $f_m$  es el tiempo de recorrido de flujo libre del modo de transporte,  $\alpha_m$  es un parámetro relacionado con la disminución de velocidad debido a la congestión vehicular, y  $\beta_m$  un parámetro que determina la pendiente de la relación entre tiempo y congestión<sup>14</sup>. El flujo vehicular total del sistema se calcula con la frecuencia de los buses y la demanda por transporte privado, donde existe un factor de equivalencia  $\kappa$  para hacer comparable la congestión de los buses con la de los autos,  $l$  es la cantidad de km promedio de cada viaje,  $a$  es el promedio de individuos que viaja en cada auto,  $K$  es la cantidad de kms de la red vial -solo las calles que tienen transporte público-.  $C$  es la capacidad promedio de las calles [veh/km] y es una variable que permite ajustar la función de tiempo a valores razonables que se observan en los datos.

Dependiendo de los valores que tomen  $\beta_m$  y  $\alpha_m$ , el resultado del tiempo de viaje puede variar. Un ejemplo con  $\beta_c > \beta_b$  se puede ver en el siguiente gráfico.

---

<sup>14</sup>Para ver más detalles sobre la discusión de estos parámetros, ver Small y Verhoef (2007).

Figura 2: Tiempo de demora de transporte público y privado a distintos niveles de congestión



## 2.4. Demandas

Finalmente, las demandas se definen como la suma de las demandas individuales por transporte público y privado, con  $d_i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$  los días que la persona usa auto y  $(5 - d_i)$  los días que usa bus. Los individuos que no tienen auto están restringidos al uso de transporte público, por lo que  $d_i = 0$ . De esta manera para calcular las demandas diarias por cada medio de transporte utilizo las siguientes funciones:

$$D_c = \frac{\sum_1^n d_i}{5}$$

$$D_b = \frac{\sum_1^n (5 - d_i)}{5}$$

Donde  $d_i$  depende de la utilidad que tiene un individuo de viajar  $d_i$  días de la semana. Esto lleva a que el modelo tenga un “problema de punto fijo”: las demandas son función de las utilidades y estas, a su vez, dependen de las demandas por transporte público y privado -que entran en las funciones de preferencia y tiempo de viaje-. Además, *a priori*, no queda claro si el equilibrio del problema es único o puede haber equilibrios múltiples.

Las particiones modales observadas se construyen como la suma de los individuos de cada estrato socio-económico que se transportan en bus dividido por el total de individuos de cada grupo de ingresos.

$$PM_s = \frac{\sum_1^n (5 - d_i) \cdot 1\{\in s\}}{5 \cdot n_s}$$

Donde  $s \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$  indica el grupo socioeconómico,  $n_s$  es el número de individuos de cada grupo socioeconómico y  $1\{\in s\}$  es una función indicatriz (binaria) que multiplica por 1 cuando el individuo  $i$  pertenece al grupo socioeconómico  $s$ , o por 0 cuando el individuo es de otro grupo.

En el próximo acápite explico cómo la solución numérica del problema considera este aspecto y me adentro en la teoría para argumentar que el equilibrio al que llega mi modelo, dadas sus características, es único.

## 2.5. Unicidad de equilibrio y punto fijo

El problema de punto fijo y unicidad de equilibrio en modelos de transporte es por primera vez investigado por Daganzo (1983). En este trabajo, el autor prueba la unicidad de equilibrio (estocástico) en una red de transporte con agentes heterogéneos cuando la función de utilidad de los agentes tiene forma cuasilineal, pero los costos de congestión afectan a todos por igual. El modelo propuesto en esta tesis tiene diferencias con las condiciones de Daganzo, debido a que la congestión afecta de manera heterogénea a los individuos, tanto en la función de preferencias como en la función de tiempo.

Más recientemente, Konishi (2001) hace una actualización del teorema de Daganzo, donde encuentra que bajo ciertas condiciones se puede generalizar un teorema que defina la unicidad de equilibrios en modelos de transporte con agentes heterogéneos.

En su trabajo, Konishi indica, que bajo el cumplimiento de tres condiciones, el modelo de transportes con agentes heterogéneos (en cualquier dimensión) tiene un equilibrio único, sin importar si los agentes difieren en preferencias de modo continuo o discreto. Las condiciones son las siguientes:

- Anonimidad (AN): los individuos no son afectados por las características heterogéneas de los otros agentes, salvo por la externalidad que provocan al elegir transporte público o privado.
- No Spillover (NS): a los individuos solo les afectan los niveles de congestión de la ruta de trayecto escogida, y no las anexas a ella -alternativas de viaje-.
- Externalidad negativa de la congestión (NEC): la utilidad de los agentes es decreciente en el nivel de congestión del sistema.

De acuerdo a este artículo, y por lo que explico en las próximas líneas, el modelo desarrollado en esta investigación cumple con las condiciones anteriores.

En primer lugar, los agentes no se ven afectados por las características propias del resto de los individuos. Los parámetros ( $\lambda_i$ ,  $\gamma_i$ , y  $\theta_i$ ) de un individuo no entran en la función de utilidad del resto, salvo por la determinación de las demandas de cada individuo, lo cual define la demanda agregada de cada modo de transporte y las particiones modales, de manera que los individuos se afectan entre sí solo a través de la congestión vehicular. Lo anterior va en línea con el criterio AN y, por lo tanto, el modelo cumple con la primera condición de Konishi.

En segundo lugar, el modelo asume implícitamente una ciudad lineal con una sola ruta de viajes para todos los individuos, con dos nodos, donde cada agente comienza del mismo origen y viaja al mismo destino. Esta característica evita que existan alternativas de viaje, por lo que el criterio de NS también se satisface en este marco teórico.

Por último, para cumplir con la condición NEC, la utilidad de los agentes debe ser decreciente en el nivel de congestión del sistema. Esto se puede ver fácilmente derivando la función de preferencias por transporte público y la función de tiempo de cada modo, que son las que se ven afectadas por la congestión en mi



modelo. La propiedad de cuasilinearidad de la función de utilidad permite derivar cada función de forma independiente y generalizar de forma más sencilla el sentido del efecto de la congestión sobre los individuos.

$$\frac{dPref_b}{dD_b} = -\frac{\epsilon}{n} < 0$$

$$\frac{dTiempo_m}{dD_c} = f_m \cdot \beta_m \cdot \alpha_m \cdot \left( \frac{frec_b \cdot \kappa + \frac{D_c \cdot l}{a \cdot K}}{C} \right)^{\beta_m - 1} \left( \frac{l}{a \cdot K \cdot C} \right) > 0$$

Como la función de preferencias entra de forma positiva en la función de utilidad, la derivada con respecto a la demanda agregada del transporte público debe ser negativa para cumplir la condición NEC, y esto se logrará siempre que  $\epsilon > 0$ . Esto sucede siempre, ya que  $\epsilon$  representa el grado de disconformidad que produce la saturación de los buses del transporte público y, cuando es calibrado, se restringe a un valor mayor a cero.

Por otro lado, la derivada de la función de tiempo con respecto a la demanda del transporte privado debe ser positiva para garantizar la condición NEC, ya que la función de tiempo se multiplica por  $-\gamma_i$ , y considero el caso en que  $\gamma_i$  tiene solo valores positivos en su distribución. Dado que los valores entregados a la función de tiempo ( $f_m$ ,  $frec_b$ ,  $\kappa$ ,  $l$ ,  $a$ ,  $K$ ,  $C$ ) son lógicamente mayores a cero y los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  son siempre mayores a 0 en una función BPR, siempre se cumplirá la condición NEC de Konishi. Lo único que es necesario restringir entonces es que el valor del parámetro  $\gamma_i$  sea siempre mayor a cero. Por lo tanto, la distribución asumida para este parámetro debe considerar valores positivos en todo el rango de la distribución. En la siguiente sección explico cómo defino la distribución de este parámetro para las simulaciones de mi modelo.

Por último, para encontrar el punto fijo de manera numérica, uso el siguiente algoritmo:

1. Defino la cantidad de individuos en mi simulación,  $n$ , y la proporción que tiene auto ( $A = 1$ ) y la que no tiene auto ( $A = 0$ ). Defino como  $n_1$  el número de individuos que tiene auto y  $n_2$  el número de individuos que no tiene.
2. Asumo una partición modal inicial, donde  $D_c^0$  es la cantidad diaria promedio de individuos que utilizan transporte privado y  $D_b^0$  indica la demanda inicial por transporte público.
3. Calculo las utilidades, para todos los individuos, de circular  $d_i$  días a la semana. Es decir, calculo seis utilidades para cada individuo:  $U_{(n_1 \times 6)}$ .
4. Calculo la diferencia entre la utilidad actual y la utilidad máxima para cada individuo.
5. El individuo con mayor diferencia de utilidad -que tiene mayor incentivo a cambiarse de medio de transporte- cambia su decisión de  $d_i$  a la correspondiente a su utilidad máxima en su vector de utilidades.
6. Repito pasos 3 a 5, hasta que el vector de diferencias de utilidades tenga un valor máximo suficientemente pequeño.

En la próxima sección presento los datos con los que alimento mi modelo y con los que realizo la calibración de los parámetros. Además, muestro los resultados de la calibración.

### 3. Datos y calibración del modelo

Lo primero que describo en esta sección son los datos que utilizo para alimentar el modelo teórico. Luego procederé a explicar la calibración del modelo: qué supuestos son utilizados, la distribución de los parámetros de interés y los resultados preliminares de la calibración.

#### 3.1. Datos

Los datos que utilizo para el modelo teórico son obtenidos principalmente de dos fuentes: la Encuesta Origen-Destino (EOD) 2012 y Sectra. La EOD 2012 es una encuesta a hogares realizada por el Observatorio Social de la Universidad Alberto Hurtado, en la que recogen información acerca de los patrones de viaje de la ciudad de Santiago y alrededores: qué viajes se realizan, desde dónde y hasta dónde, en qué modos de transporte, con qué tiempos de viaje percibidos, entre otros. La muestra de la encuesta es de 18.000 hogares, escogidos al azar de 45 comunas de la Región Metropolitana, y fue aplicada entre julio de 2012 y noviembre de 2013. Además, la encuesta incluye corrección y expansión comunal, lo que permite un análisis representativo de la Región Metropolitana.

Por otro lado, Sectra -Secretaría de Transporte y Telecomunicaciones- es un organismo técnico del MTT especializado en planificación de transporte. Sus principales funciones son proponer planes de desarrollo de los sistemas de transporte urbano, evaluar socialmente iniciativas de inversión en infraestructura y gestión de los sistemas de transporte, y desarrollar las metodologías y modelos necesarios para el análisis en transporte. De esta manera, utilizo algunos de sus estudios y simulaciones como insumo para el desarrollo de esta tesis.

El Cuadro 2 muestra los valores de los parámetros principales de mi modelo, y la fuente de información usada para determinarlos.

Teniendo en cuenta los datos descritos en el Cuadro 1, en las siguientes líneas explico la distribución de los parámetros más relevantes del modelo teórico -los que racionalizan la heterogeneidad de los agentes-:  $\lambda_i$ ,  $\gamma_i$ , y  $\theta_i$ , los que, finalmente, se calibran para que el modelo presente una predicción teórica lo más cercana posible a la realidad.

#### 3.2. Distribución de los parámetros

En primer lugar, el parámetro de ingreso monetario ( $\lambda_i$ ) es distribuido de la misma forma que la distribución del ingreso de los hogares que se observa en la EOD 2012 -muy similar a CASEN 2011-. En la Figura 4 se presenta un histograma del ingreso de los hogares.

Esta distribución se puede traducir en cuatro momentos: promedio de ingresos, desviación estándar, simetría y curtosis. En el Cuadro 3 muestro estos valores para la EOD 2012.

En la segunda columna del Cuadro 3 hago una normalización de la distribución, dividiendo por la media de los ingresos con el objetivo de contar con un parámetro más sencillo de trabajar en el modelo. Lo único que cabe destacar en este punto es que dado que los individuos del sector socioeconómico bajo deben tener

Cuadro 2: Valores de las constantes del modelo

Parámetros	Valor	Fuente
Precio de Tarifa del transantiago	675	Transantiago
Capacidad promedio de las calles [veq/km]	550	Propia, siguiendo a Silva y Basso (2014)
Velocidad de flujo libre de t. público [km/hr]	40	Transantiago
Velocidad de flujo libre de t. privado [km/hr]	60	Silva y Basso (2014)
Frecuencia de buses [buses/hr]	20.21	Silva y Basso (2014)
Red vial de buses [km]	2154	EOD 2012
Pasajeros por auto [km]	1.5	EOD 2012
$\beta_c$	1.8	Propia
$\alpha_c$	0.14	Propia
$\beta_b$	1	Propia
$\alpha_b$	0.225	Propia
Tiempo de viaje promedio [min]	37	EOD 2012
Viajes promedios diarios	2.78	EOD 2012
Distancia recorria por viaje [km]	10	Silva y Basso (2014)
Costo operacional del auto [\$/km]	260.7	Silva y Basso (2014)
Costo operacional diario [\$/diarios]	6882.48	Cálculo propio
Estratos socioeconómicos	Rango de ingresos por hogar	Fuente
Ing. Bajo	[0 - \$242.177]	Sectra
Ing. Medio-Bajo	[\$242.177 - \$484.355]	Sectra
Ing. Medio	[\$484.355 - \$968.710]	Sectra
Ing. Medio-Alto	[\$968.710 - \$1.937.419]	Sectra
Ing. Alto	[\$1.937.419 - ...]	Sectra

Cuadro 3: Cuatro momentos de la distribución de ingresos de los hogares, según EOD 2012.

	EOD2012	Normalizado
Media	\$ 802,105	1
Desv. Estándar	\$ 850,087.7	1.060
Simetría	5.6634	5.6634
Curtosis	58.88	58.88

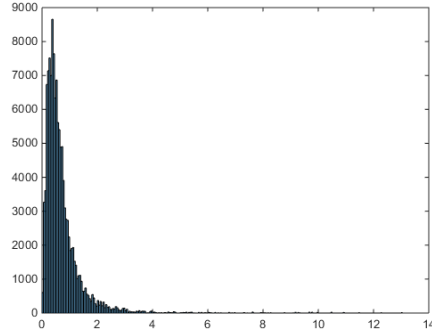
un mayor impacto a causa del costo monetario que los individuos más ricos, la distribución de ingresos entra elevada a -1 para definir el parámetro  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i \sim \left( \frac{Y_i}{\bar{Y}} \right)^{-1}$$

De esta manera, cada individuo obtiene un valor aleatorio de  $\lambda_i$ , según la función de probabilidad que entrega la distribución de ingresos que observamos en la EOD.

En segundo lugar, el parámetro que define el costo del tiempo ( $\gamma_i$ ) es distribuido según una distribución normal para cada estrato socioeconómico, de manera que existen cinco distribuciones para el parámetro tiempo. Los estratos son fácilmente identificables según el valor del parámetro  $\lambda_i$  que tiene cada individuo. La media de cada distribución está centrada en el valor monetario del tiempo (VMT [\$/s]) que calcula

Figura 3: Histograma del ingreso de los hogares, según la EOD 2012.



Sectra para cada grupo de ingresos<sup>15</sup> y, dada la forma en que se construye el VMT, el parámetro de tiempo está correlacionado negativamente con el parámetro de ingresos. La desviación estándar de estas cinco distribuciones se define proporcional al valor medio de la distribución, lo que ayuda a garantizar que ningún valor de la distribución de  $\gamma_i$  tome valores negativos (condición necesaria para el cumplimiento de un equilibrio único en el modelo). Con todo esta información, se define que la desviación estándar sea un 20% del promedio de cada distribución lo que permite que las distribuciones se encuentren interpoladas y no haya discontinuidades entre los parámetros de los distintos estratos socioeconómicos. Esto se representa en la Figura 4.

Cuadro 4: Valor monetario del tiempo, por estrato socioeconómico.

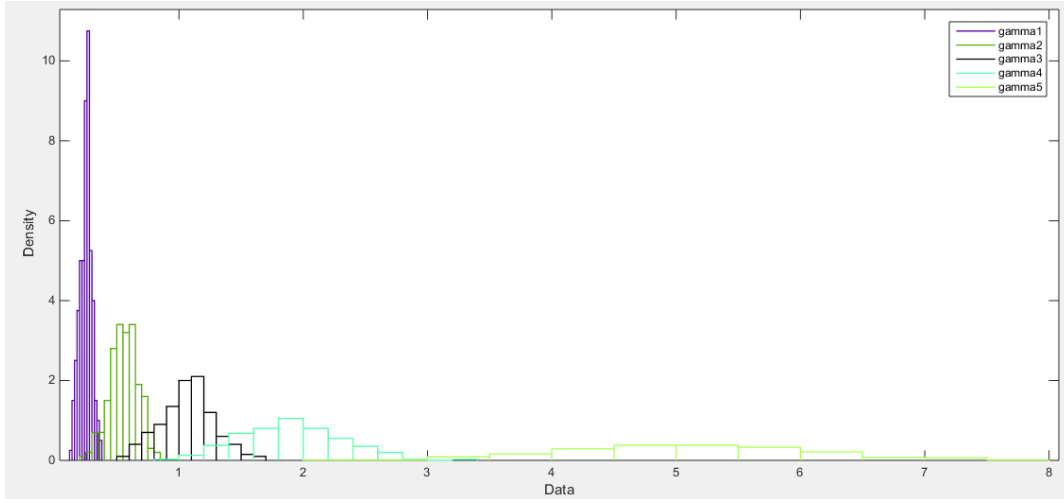
Parámetro	Valor
$VMT^1$ [\$/s]	0.25
$VMT^2$ [\$/s]	0.57
$VMT^3$ [\$/s]	1.08
$VMT^4$ [\$/s]	1.92
$VMT^5$ [\$/s]	5.17

La distribución del parámetro tiempo, para cada estrato socioeconómico se puede apreciar en la siguiente figura:

El parámetro de preferencias ( $\theta_i$ ) representa lo que usualmente en modelos de transporte se conoce como “constantes modales”. Este parámetro es el que permite ajustar la simulación a lo observado en los datos en el proceso de calibración, lo que es fundamental para entender los resultados posteriores de las simulaciones. Por simplicidad, y para mantener la heterogeneidad de parámetros intragrupo socioeconómico, defino que cada estrato posee una distribución uniforme ( $U(A_s, B_s)$ ) para el parámetro  $\theta_i$ , con distinta media ( $\frac{A+B}{2}$ ), la cual es calibrada. Por otro lado, el ancho de la distribución ( $B-A$ ) depende de la cantidad de individuos sin auto. Este supuesto lo utilizo para racionalizar el hecho que agentes pobres tengan preferencias intrínsecas por buses a igualdad de costo monetario y tiempo; asimismo, que individuos ricos tengan preferencias

<sup>15</sup>Este valor es calculado con el método de Sectra, pero es actualizado con el valor de la UF en octubre de 2016.

Figura 4: Histograma del parámetro tiempo, para cada estrato socioeconómico.



mayores por transporte privado. Este supuesto es razonable, pues la calibración fuerza a los parámetros de preferencias, de manera que los individuos pobres que poseen auto (15 % aprox.) prefieran más el uso de auto que de buses para poder llegar a la partición modal observada ( $pm_1 = 83\%$ ). Básicamente en este grupo todos los individuos que tienen un auto lo compraron porque lo utilizarían con alta necesidad. A su vez, las personas más adineradas (grupo 4 y 5 de ingresos) que tienen auto no siempre lo usan (ver Cuadro 5), por lo que la calibración fuerza sus parámetros para que tengan mayores preferencias por transporte público que el resto de la población. El supuesto lleva a que el valor promedio de la distribución para cada grupo de ingresos sea más bien homogéneo entre grupos, lo cual es razonable desde el punto de vista de que, a igualdad de costo monetario y costos en tiempo, debería haber tanto individuos pobres como individuos ricos que tengan preferencias intrínsecas por transporte público y transporte privado.

Cuadro 5: Porcentaje de individuos sin auto en cada estrato socioeconómico

Estrato socioeconómico	Sin auto (%)
1	84 %
2	66 %
3	46 %
4	23 %
5	5 %

Esto nos da un total de seis parámetros a calibrar, ya que también estoy permitiendo variar el efecto de la saturación del transporte público sobre las preferencias por modo de transporte, lo cual está definido por la variable  $\epsilon$ .

En la próxima sección explico el método que utilizo para calibrar los parámetros y los observables con los que ajusto el modelo a los datos.

### 3.3. Calibración

Para realizar la calibración utilizo una función de pérdidas que se construye con las particiones modales observadas en la EOD 2012 y las simuladas por el modelo. Utilizar estos observables para ajustar el modelo es usual en la literatura de transporte<sup>16</sup>.

$$L = \sum_{s=1}^6 \delta_s \cdot (PM_s - pm_s)^2$$

Lo que hace esta función es sumar la diferencia, al cuadrado, de las particiones modales estimadas  $-PM_s-$  y las observadas  $-pm_s-$ . La sumatoria va hasta 6, pues se consideran las cinco particiones modales de los estratos socioeconómicos, más la partición modal agregada del sistema. La partición modal se entiende como la cantidad de individuos que usan transporte público al día, respecto del total de individuos en la ciudad. El parámetro  $\delta_s$  corresponde a los pesos que tiene cada partición modal en la función de pérdida y por ahora asumo que son todos iguales a 1.

El método que utilizo para calibrar y entregarles parámetros de preferencias tanto a individuos que tienen auto como a los que no tienen auto, es minimizar la función de pérdidas definida anteriormente, entregándole parámetros iniciales para las cinco distribuciones de  $\theta_i^0$ , y un valor inicial para el parámetro de saturación del transporte público,  $\epsilon^0$ . Dentro de la maximización se sigue el siguiente algoritmo:

1. Se entregan parámetros iniciales para minimizar  $L$ .
2. Se calcula la función de utilidad de los individuos en el escenario base para el uso de transporte privado y de transporte público.
3. Se ordenan los individuos según su diferencial de utilidades ( $U_{t.privado} - U_{t.publico}$ ). Los primeros individuos de cada estrato socioeconómico son los que se definen como “no cautivos” del transporte público, es decir, que poseen auto ( $A = 1$ ). Estos primeros individuos se seleccionan hasta cumplir con los porcentajes de posesión de vehículos que se observan en los datos para cada grupo socioeconómico.
4. Los individuos con auto toman decisiones, con lo que se encuentra el punto fijo del modelo y las particiones modales, de acuerdo al algoritmo explicado en el acápite 3.5 de la tesis.
5. Calculo la función de pérdidas,  $L$ , y se cambian los parámetros de  $\theta_i$  y  $\epsilon$  para iniciar una nueva iteración en la maximización.
6. Se repiten pasos 2 a 4, hasta obtener el mínimo de la función de pérdida. Los parámetros obtenidos en esa última iteración son los que, finalmente, son calibrados.

El resultado de la calibración de los parámetros de la distribución de preferencias se encuentra en el Cuadro 6.

Esto señala que en todos los grupos socioeconómicos hay individuos que, a igual costo monetario y tiempos de viaje, prefieren transporte privado, y otros que prefieren transporte público. Esto, pues el *cutoff* que determina la preferencia intrínseca por los medios es  $\phi_0 = 1$  y, como las distribuciones tienen valores

<sup>16</sup>Basso y Silva (2014) utilizan las particiones modales en período *peak* y fuera *peak* para ajustar su modelo.

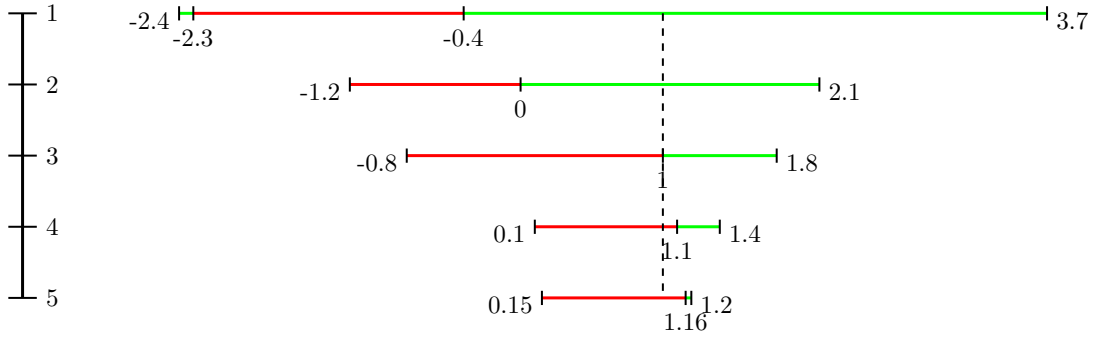
Cuadro 6: Parámetros calibrados

Parámetros	Valores
$Dist \sim U^1$	[-2.4 , 3.7]
$Dist \sim U^2$	[-1.2 , 2.1]
$Dist \sim U^3$	[-0.8 , 1.8]
$Dist \sim U^4$	[0.06 , 1.4]
$Dist \sim U^5$	[0.15 , 1.2]
$\epsilon$	0.05

menores y mayores a 1, existen individuos que prefieren buses, e individuos que *ex-ante* prefieren auto, en cada uno de los grupos.

No obstante, estos individuos se seleccionan en el algoritmo de calibración y solo los individuos con ciertos parámetros de  $\theta_i$  de cada grupo socioeconómico son los que poseen vehículo y toman decisiones por uso de transporte privado o público. En la Figura 5 muestro los parámetros de  $\theta_i$  que tienen los individuos con auto, de acuerdo a lo definido en el algoritmo de calibración.

Figura 5: Parámetro de preferencias, según estrato socioeconómico y tenencia de auto.



Los resultados de la calibración muestran que las distribuciones de los distintos estratos tienen una media bastante homogénea, pero con anchos de banda más cortos cuando mayor es el nivel de ingresos. Los parámetros de los individuos que poseen auto se encuentran dentro del intervalo de color rojo que tiene cada distribución. Esto no quiere decir que en el área roja no haya individuos sin auto, sino que todos los individuos que poseen vehículo se encuentran solo en este margen. Es evidente que para los estratos socioeconómicos más pobres, condicional en que tienen auto, la preferencia intrínseca de moverse en transporte público es mucho menor que para los más ricos. Esto sugiere que los individuos pobres que poseen vehículo tienen ciertas características exógenas diferentes del nivel de ingreso, que los lleva a comprar un auto y transportarse en él de manera casi obligatoria. Básicamente, si un individuo de bajos ingresos se compra un vehículo, lo ocupa.

Esto se puede racionalizar mejor al analizar el ratio tenencia de vehículos y uso, en cada estrato socioeconómico: el porcentaje de individuos que posee auto en el sector socioeconómico más pobre llega aproximadamente a un 15% y la partición modal de autos es prácticamente el mismo valor, por lo que el ratio es cercano a 1. Esa relación va haciéndose menos estrecha a medida que los individuos tienen más ingresos y, por ende, es razonable pensar que los valores del parámetro de preferencia para los individuos

más ricos se acerquen más al *cutoff* de preferencias modales ( $\phi_0 = 1$ ). Esto último señala que existen individuos del grupo socioeconómico 4 y 5 que tienen auto y tienen preferencias mayores por transporte público que por transporte privado. Racionalizar esto es más complejo, pues, si los individuos poseen auto, uno debiera esperar que lo prefieran. El punto aquí es que la holgura proveniente de su mejor situación económica les permite comprar vehículos para su uso en viajes esporádicos y fines de semana, por lo que la decisión de compra no pasaría primordialmente por necesidad de transporte, como sucede en el pequeño grupo de individuos del grupo 1 que posee auto.

Las particiones modales observadas y simuladas en la calibración se encuentran en el Cuadro 7 y en la Figura 6. El orden de las particiones modales va desde los más pobres ( $PM_1$ ) a los más ricos ( $PM_5$ ). Además, incluyo en la tabla la simulación de referencia que realiza Sectra para comparar cuán cercanas son las estimaciones.

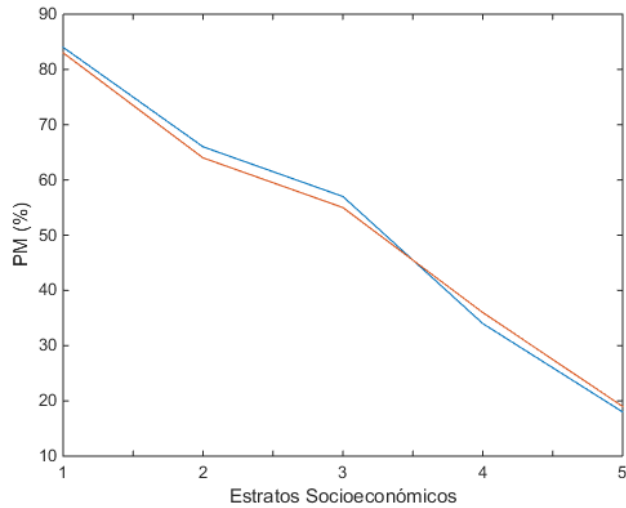
Cuadro 7: Particiones modales simuladas y observadas con 20.167 individuos

	1	2	3	4	5	Total
P.M. Simulada	0.84	0.66	0.57	0.34	0.18	0.54
Porcentaje de individuos (%)	12	23	33	21	11	100
P.M. EOD 2012	0.83	0.64	0.55	0.36	0.19	0.49
Porcentaje de individuos (%)	12	27	34	19	8	100
P.M. Sectra	0.68	0.70	0.57	0.32	0.15	0.53
Porcentaje de individuos (%)	13	24	32	20	11	100

Se aprecia que el ajuste es bastante cercano a lo mostrado en la EOD 2012 y a las particiones modales simuladas por Sectra de los grupos 2, 3, 4, y 5. El único grupo que tiene diferencias significativas con la simulación es el grupo 1. Esto se puede explicar por diversos motivos: Sectra en su análisis considera 38 de las 45 comunas de Santiago, solo considera viajes interzonales, y los viajes de su simulación provienen de las tasas de viajes de la EOD 2001 (escenario de desarrollo urbano, modelo de ingreso, modelo de motorización, etc.). Por lo tanto, es lógico que haya ciertas diferencias que se remarquen en los grupos de menor número de individuos.



Figura 6: Particiones modales simuladas versus observadas.



Con los parámetros ya calibrados es posible pasar a la siguiente etapa, de simular los distintos escenarios de política para la RVPD. En la siguiente sección muestro los principales resultados de la simulación de TV, y los casos híbridos entre TV y RV.

## 4. Simulaciones

### 4.1. Resultados generales

En esta sección uso el modelo teórico para simular los distintos escenarios de política que el MTT podría implementar en las ciudades de Chile. En cada ocasión resuelvo el problema de optimización de los agentes, de manera de predecir cuáles son las variables de servicio de la red vial, la utilidad de cada agente y el bienestar social. En un primer momento, explico los resultados de la simulación de TV completa, un escenario particular que me permite identificar si el modelo y los ejercicios de simulación van en la dirección deseada. En una segunda parte, hago un análisis de bienestar, donde optimizo una función de utilidad agregada y determino cuál es el escenario de política óptimo bajo distintos enfoques de redistribución de la recaudación. En aquel análisis muestro los resultados de las simulaciones para los casos híbridos entre RV y TV, es decir, todas las combinaciones posibles entre precios de PD y días de RV a la semana, lo cual me entrega toda la gama de resultados que el Ejecutivo puede obtener debido a la aplicación de esta política pública. Finalmente, hago un análisis distribucional, donde muestro los pesos que el planificador central está dando a la distribución cuando prefiere aplicar una política distinta a TV (no de máxima eficiencia), lo que relaciono con la literatura de eficiencia y distribución explicada en la sección 1.

#### 4.1.1. Tarifación por congestión

La tarifación vial (o tarifación por congestión) se entiende en esta tesis como el escenario en el que el Ejecutivo impone una RV con pago de PD los cinco días de la semana. Esto quiere decir que quien quiera viajar en transporte privado debe pagar siempre un monto diario fijado de manera exógena por el Ejecutivo.

Aprovechando que Sectra tiene simulaciones de TV para una tarifa de \$3.000, \$4000, y \$5.000, simulo esos tres precios y calculo las particiones modales en estos escenarios. Luego presento la comparación entre mis resultados y los que calcula Sectra<sup>17</sup>. La comparación entre el cambio de las particiones modales simuladas por mi modelo y Sectra es un indicador de si el modelo desarrollado en esta tesis se mueve en la dirección correcta para cada política simulada. Esto es importante, pues se hace en el contexto de que Sectra cuenta con un programa mucho más complejo que el desarrollado en esta tesis; no obstante, tiene algunos problemas como la no-actualización de las características de la ciudad de Santiago<sup>18</sup> y la nula capacidad para predecir el efecto de una política híbrida entre TV y RV.

Los resultados de la simulación de TV se pueden observar en la siguiente tabla:

Cuadro 8: Simulación de tarificación vial, y comparación con simulación de Sectra.

	PM1		PM2		PM3		PM4		PM5		Total	
	Sim.	Sectra	Sim.	Sectra	Sim.	Sectra	Sim.	Sectra	Sim.	Sectra	Sim.	Sectra
Base	84	68.3	65.9	70.1	57.1	57.1	33.8	31.9	17.6	15.3	54.2	53
\$3,000	95.5	88.9	78.7	81.5	65.1	65	45.7	35.6	17	16.5	63.9	59
\$4,000	97.9	100	84.9	84.8	67.3	67.7	49.5	36.9	17	16.9	67.3	61
\$5,000	100	100	89.7	87.5	70.6	70	54.8	38.4	17.6	17.4	71	62
\$10,000	100	-	100	-	84.3	-	61.6	-	29.2	-	84	-

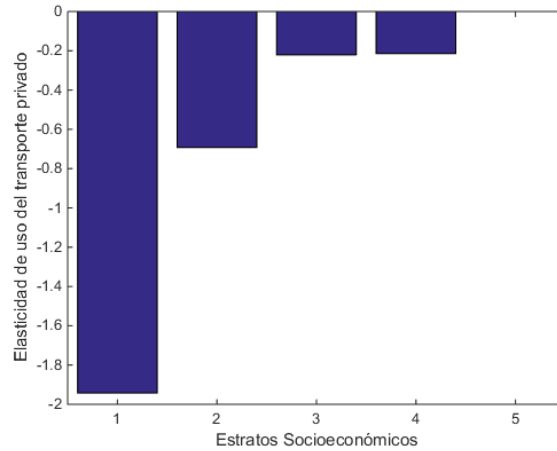
De esta tabla se puede observar que las particiones modales simuladas tienen un movimiento similar al de las simuladas por Sectra para todos los grupos menos para 4, el cual tiene mayor elasticidad que lo calculado por Sectra. De acuerdo al primer punto, la partición modal agregada de la simulación propia aumenta en 17% desde el escenario base al caso de TV con un cobro de \$5.000 diarios, mientras que en el caso de Sectra aumenta solo un 9%. Esto habla de que mi modelo captura una mayor elasticidad agregada de uso del auto frente a un aumento de precios de TV. La elasticidad -promedio- calculada por mi modelo es de -0.27 para el uso de transporte privado cuando se fija una política de TV con distintos precios. Como muestro más adelante, la elasticidad calculada se enmarca en lo estudiado por la literatura.

El cálculo de las elasticidades intragrupo señala que, para el estrato socioeconómico más bajo, condicional a la tenencia de automóvil, la elasticidad promedio de aumentar el costo operacional del auto en un 1% es de -1.94; para el grupo 2 es de -0.692; el grupo 3 cuenta con una elasticidad de -0.221; el grupo 4 de -0.214; y el grupo 5 de aproximadamente 0. Estos resultados van acorde a lo que sugiere el grueso de la literatura de transporte que indica una mayor elasticidad a medida que el grupo socioeconómico tiene menos ingresos. Esto se puede apreciar en el siguiente gráfico:

<sup>17</sup>La simulación de Sectra se realiza con el programa ESTRAUS.

<sup>18</sup>La última actualización del modelo Etraus se hizo con características de la ciudad de Santiago para el año 2001.

Figura 7: Elasticidades de uso de transporte privado para cada grupo socioeconómico



Para comparar estas elasticidades con lo estudiado en la literatura de transportes realizo una revisión de las investigaciones que han calculado la elasticidad de uso del automóvil frente a un cambio en el costo operacional de este. Este cambio puede deberse a distintos factores como precios de combustible, impuestos a la gasolina, tarifas de congestión, cobros de estacionamiento, seguro automotor y tarifa de transporte público, pero me centro principalmente en dos que han sido más estudiados en la literatura: tarifas de congestión y cambios en el precio de la bencina. En el siguiente cuadro se encuentra un resumen de las elasticidades calculadas en la literatura. Dado que la bencina representa un 20 % del costo operacional, las elasticidades mostradas en el Cuadro 9 son escaladas para entregar un valor acorde al costo operacional del vehículo. Hymel, Small y Van Dender (2010) encuentran que la elasticidad del uso del vehículo frente a un aumento en el precio de la bencina es de  $-0.026$  en el corto plazo, elasticidad de  $-0.13$  respecto del costo operacional.

En general, los estudios que han investigado las vías tarifcadas concluyen que la elasticidad frente al aumento de las tarifas está entre  $-0.1$  y  $-0.45$ , por lo que un incremento de 10 % en la tarifa provoca una reducción del uso del transporte privado de entre 1 % y 4.5 %, valores coherentes con lo estimado en mi modelo. Una excepción es Basso y Silva (2014) los que, según cálculos propios, llegan a una elasticidad de  $-0.81$ . Este resultado puede deberse a que su modelo considera mejoras al transporte público y reducciones a la tarifa de los buses de forma endógena, lo que ampliaría la diferencia en el beneficio de transportarse en modo privado o público. De acuerdo a esto, integrar estas consideraciones en mi modelo debería hacer que la elasticidad de la demanda agregada aumente frente a cambios en los precios. En futuros avances de esta investigación planeo hacer esto formalmente; sin embargo, en la sección 4.2 explico los resultados que tendría la redistribución de la recaudación a través de menores precios de transporte público, lo cual es un primer acercamiento a este tipo de análisis.

Los estudios sobre los cobros por cordones zonales, realizados para Singapur y Estocolmo, encuentran que un aumento de tarifa de 10 % reduce entre 2 % y 3 % el volumen de tráfico en Singapur, y entre un 7 % y 9 % en Estocolmo.

Matas y Raymond (2003) resumen estudios previos y desarrollan un modelo de demanda por calles tarifadas usando datos de España entre los años 1980 y 1998. Encuentran que la elasticidad de corto plazo de la tarifa está en un rango entre -0.21 y -0.83, margen coherente con la elasticidad encontrada en mi estudio. Por su parte, Odeck y Svein Brathan (2008) encuentran elasticidades de -0.54 en el corto plazo para 19 ciudades noruegas con caminos tarifados, y elasticidades de -0.84 en el largo plazo. Arentze, Hofman y Timmermans (2004) encuestan a los conductores para determinar su expectativa a responder a tarifas por congestión y encuentran una elasticidad de entre -0.35 y -0.39.

Cuadro 9: Elasticidades en la literatura

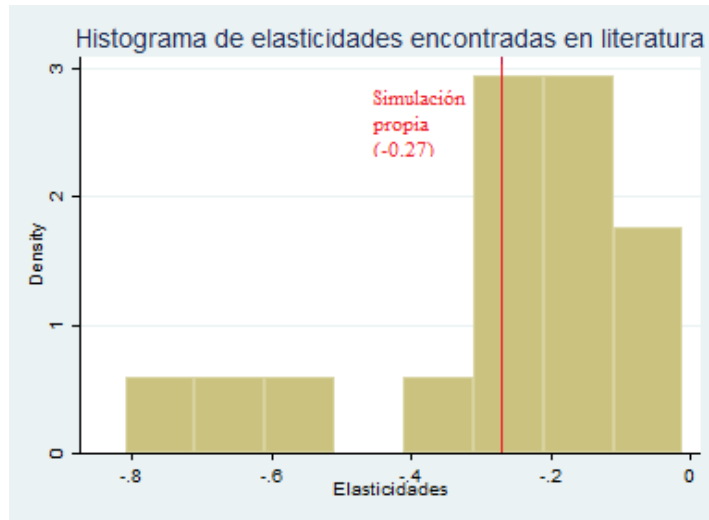
	Estudio	Año	Elasticidad <sup>a</sup>	Características	Fuente
Cobro por congestión	16 zonas de cobro en US	1970	-0.170	Zonal	Weustefeld y Regan (1981)
	Encuesta a conductores		-0.340	Encuesta	Arentze, Hofman y Timmermans (2004)
	Revisión de estudios previos		-0.520	Encuesta	Matas y Raymond (2003)
	Golden Gate y SF Bay Bridge	1979-1984	-0.100	Zonal	Harvey (1994)
	Roads in New Hampshire	1979-1984	-0.100	Zonal	Harvey (1994)
	Numerosos centros de cobro en US		-0.225	Zonal	Wilbur Smith y Associates (1995)
	Puentes y túneles en NYC	1970-1990	-0.250	Zonal	Hirschman et al. (1995)
	New Jersey Turnpikes	1999	-0.200	Zonal	UTM (2000)
	Lee County Florida	1999	-0.195	Zonal	Cain et al. (2001)
	Singapur	1975-2006	-0.260	Zonal, Hora Peak	Olszewski (2007)
	Estocolmo	2006-2011	-0.700	Zonal, Hora Peak	Börjesson et al. (2012)
	Santiago de Chile	2001	-0.810	Hora Peak	Silva y Basso (2014)
	Santiago de Chile	2016	-0.270	Total	Estimación propia
Precio de combustible	US	1966-2004	-0.130	Corto plazo	Hymel, Small y Van Dender (2010)
	Norte América y Europa	1929-1991	-0.100	Corto plazo	Goodwin, Dargay y Hanly (2004)
	US	1950-1994	-0.260		Schimek (1997)
	US	1966-2001	-0.235	Corto plazo	Small y Van Dender (2010)
	US	1997-2001	-0.130	Corto plazo	Small y Van Dender (2010)

<sup>a</sup>En varios casos, la elasticidad reportada es un promedio de lo encontrado en las estimaciones de cada investigación.

Luego, para comprender en qué medida se enmarca la elasticidad calculada de mi modelo con la literatura realizo un histograma (Figura 8). Se puede notar que la elasticidad calculada por mi investigación (-0.27) se encuentra dentro del núcleo de la literatura (entre -0.1 y -0.37, en promedio). Por último, cabe destacar que las elasticidades difieren mucho de Basso y Silva (2014), quienes entregan un efecto de -0.81. Esta diferencia la atribuyo principalmente a la endogeneidad que ellos les otorgan a ciertas variables de transporte público (como frecuencia de buses, tarifa de buses, etc.) y que ellos tienen elección horaria que les permite tarifificar solo en hora *peak*, además de que sus datos están calibrados para la situación de Santiago en 2005, y no necesariamente representan lo que sucede actualmente en la ciudad.

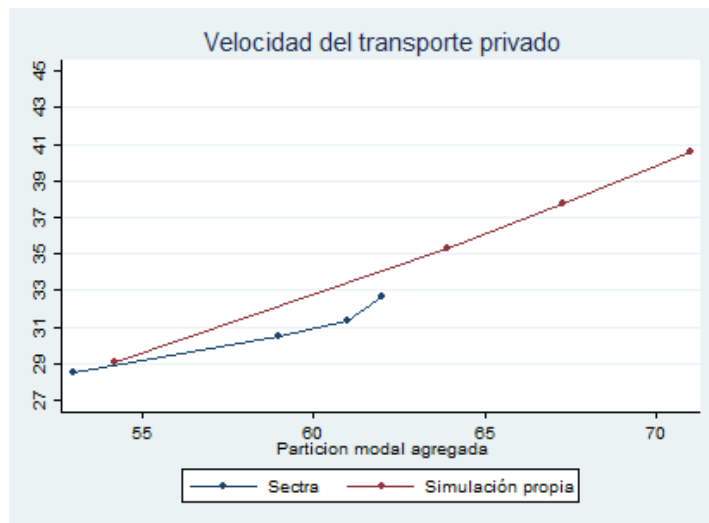
Finalmente, para corroborar que las variables de servicio se mueven dentro de valores razonables hago una comparación entre lo que resulta de mi simulación y lo que obtiene Sectra para las velocidades del transporte privado. Utilizo este medio de transporte, pues las variables de servicio son más sensibles que las del transporte público a distintos precios de PD y días de RV. Para poner estas variables en una dimensión comparable, realizo un gráfico de las velocidades simuladas para cada nivel de partición modal agregada. En el escenario de referencia se observan valores bastante cercanos entre ambas simulaciones; no obstante, mientras mayores son las particiones modales encuentro una mayor pendiente para la curva de elasticidades en la simulación propia. Sin embargo, esta diferencia en la reacción de las velocidades - y, por lo tanto, de

Figura 8: Elasticidades en la literatura



los tiempos de viaje - no es particularmente grande respecto a lo que calcula Sectra y difícilmente es lo que explica las diferencias en el cálculo de las elasticidades entre ambas simulaciones.

Figura 9: Velocidad simulada versus observada



Los ejercicios anteriores, me han servido para validar la capacidad predictiva de mi modelo para simular los efectos de las políticas de transporte en el sistema vial de Santiago de Chile. En la siguiente sección, simulo los efectos que tendría la política de RVPD para una tarifa de PD y una cantidad de días de restricción decididos por el Ejecutivo de manera exógena. Además, el análisis incluye una diferenciación entre distintos métodos de redistribución de la recaudación para contrastar el resultado del óptimo y generalizar de mejor forma la política eficiente.

## 4.2. Análisis de bienestar

Para calcular la función de bienestar social uso el enfoque utilizado por Basso y Silva (2014), el cual consiste en sumar las utilidades de todos los individuos, cada una dividida por el parámetro  $\lambda_i$  que acompaña al costo monetario en la función de utilidad individual. La intuición detrás de esto es que estamos sumando dinero -costo monetario, más valor del tiempo en dinero, y valor de preferencias intrínsecas en dinero-. Esta forma de sumar utilidades valora más a aquellos con alta disposición a pagar, lo cual está relacionado con el ingreso de los individuos. De esta manera, la medida podría ser considerada como “regresiva”, ya que la gente más pobre tiene una menor ponderación en el bienestar agregado; no obstante, es la mejor forma de cuantificar las ganancias sociales. En la sección 4.3 analizo en qué nivel cambian los resultados del bienestar cuando se pondera de mayor forma a los individuos de estratos socioeconómicos más bajos.

$$BS = \sum_1^n \frac{U_i}{\lambda_i}$$

Para hacerse cargo del dinero recaudado en el transporte privado, debido a la política implementada, exploro dos métodos de distribución: en un primer lugar, asumo que la recaudación es devuelta completamente a quienes pagan el PD, de manera que circulen en auto solo quienes más valoran el uso del transporte privado. Este método lo defino como *redistribución por asignación*. En segundo lugar, asumo que la recaudación se utiliza para disminuir el precio del transporte público. Esta es una forma de endogeneizar las tarifas de los buses cuando aumenta la recaudación y sirve para comprender cómo cambian las dinámicas del bienestar social cuando los beneficiados por la redistribución monetaria se focalizan en los usuarios del transporte público. Esta forma de redistribución la denomino *redistribución por transporte público*.

### Redistribución por asignación

El primer tipo de redistribución está motivado en el contexto de un planificador central que tiene información perfecta y conoce exactamente la valoración por transporte privado de todos los agentes de la sociedad. Asimismo, el planificador conoce el nivel en el cual se elimina la externalidad y decide que quienes usen transporte privado sean los que más lo valoran. Es decir, que a través de asignaciones se defina cuándo un agente puede moverse en transporte privado o transporte público. Este método tiene tres efectos: primero, un efecto de asignación, que produce que individuos que antes querían transportarse en auto ahora deben transportarse en bus; segundo, un efecto velocidad, que provoca que todos los individuos se muevan más rápido a mayor transporte público, y tercero, un efecto preferencias, que disminuye la utilidad de los individuos cuando la saturación de los buses es muy alta. Este caso, al ser puras asignaciones, no tiene transferencias explícitas entre agentes y el Estado, sino que se racionaliza como un cobro de PD que es devuelto a los agentes al final del período.

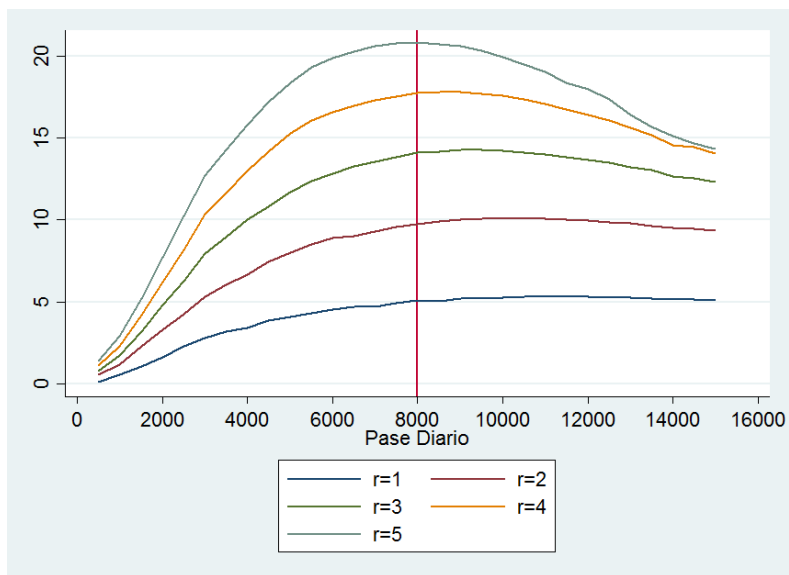
El análisis desarrollado procede de la siguiente forma:

1. Se fija un precio de PD y cantidad de días de RV.
2. Se calculan particiones modales, lo que define las velocidades de los modos a cada uno de esos precios, y se guarda el vector de demandas por transporte de cada individuo.

3. Se calculan las utilidades individuales y el  $BS$  cuando el precio del PD y los días de restricción son iguales a 0, sujeto al vector de demandas determinado en 2.
4. Se repiten 2 y 3 con un nuevo precio de PD y cantidad de días de RV.

El resultado de la simulación del bienestar social con este método de recaudación se muestra en la Figura 10. La figura indica que el óptimo se alcanza cuando se cobra una tarifa de \$8.000 diarios, con una restricción vehicular de cinco días a la semana. Esto quiere decir que la aplicación de TV pura eliminaría la externalidad provocada por la congestión vehicular y permitiría que la sociedad alcanzara su máximo bienestar en un esquema de redistribución por asignación.

Figura 10: Bienestar social a distintos días de RV y precios de PD, método de redistribución por asignación (cifra medida en cientos de miles).



El beneficio de la política es de aproximadamente \$2.000.000 diarios, lo que equivale a aproximadamente \$1.056 por persona<sup>19</sup>. Para la ciudad de Santiago, que tiene cerca de cinco millones de habitantes, esto equivale a un beneficio total de 7.9 millones de dólares diarios<sup>20</sup>. Esto es, 2.876 millones de dólares al año, lo que representa un 1.19 % del PIB nominal de Chile estimado para 2017<sup>21</sup>.

En términos de congestión, la partición modal agregada que resulta de la aplicación de la política eficiente es de 80 % en transporte público (25 % más que el escenario de referencia). En este nivel, el grupo uno se encuentra en una partición modal de 100 %, el grupo dos aumenta a 99 %, el grupo tres a 79 %, el grupo cuatro a 67 % y el grupo cinco a 24 %. En este margen, las variables de servicio son una velocidad de 30.5

<sup>19</sup>Se simula con un total de 1893 individuos.

<sup>20</sup>Se considera el valor del dólar a 670 pesos chilenos.

<sup>21</sup>PIB de Chile para 2017 se obtiene de estimación realizada por el Fondo Monetario Internacional (FMI). Visto en la página web oficial del FMI, <http://www.imf.org/external/index.htm>.

km/hr para el transporte público y 47.4 km/hr para el transporte privado. Es necesario destacar que estos valores son promedios diarios y, por ende, deben ser interpretados con cuidado y no generalizar a las horas de mayor congestión (hora *peak*). Este problema se espera solucionar en próximos avances de esta investigación, cuando se extienda el modelo a una etapa de elección horaria. La partición modal agregada para cada precio y día de restricción y las velocidades de los modos de transporte se encuentran en el anexo 1, 2 y 3 de la tesis.

La dinámica de bienestar intragrupos y al interior de cada grupo se captura en las Figuras 11 y 12, respectivamente.

Figura 11: Bienestar de cada estrato socioeconómico

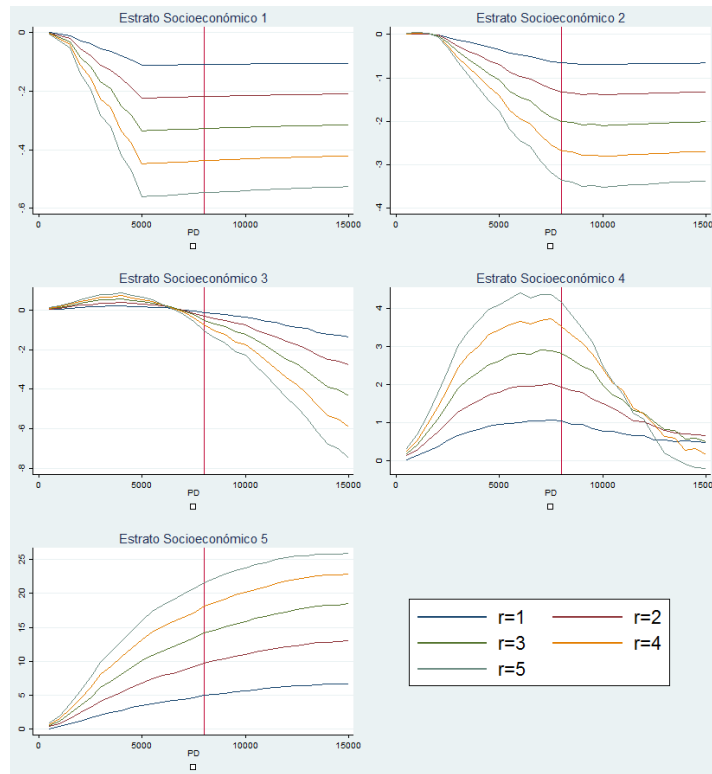
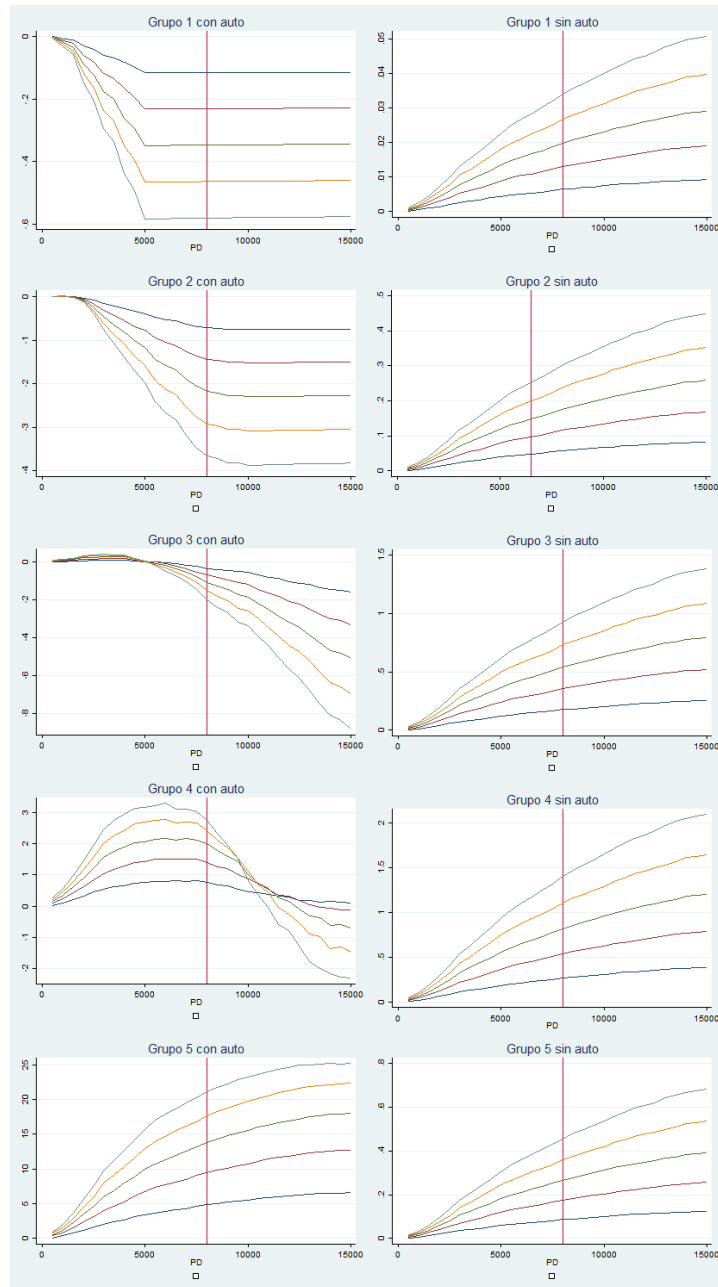




Figura 12: Bienestar dentro de cada estrato socioeconómico, según posesión de auto



De las figuras se desprende que los individuos sin auto siempre están mejor a medida que el precio del PD aumenta, lo que indica que el efecto de aumento en velocidad del transporte público es superior a la incomodidad derivada de la saturación de los buses, en todos los escenarios de política.

Por otro lado, es evidente que los cambios de utilidad de los nuevos grupos provienen del efecto que perciben los dueños de autos en cada grupo. En el grupo 1 y 2 se ve una disminución de utilidad respecto del escenario de referencia (fijado en cero). La explicación de esto es que la disminución de utilidad producto de

la asignación de varios individuos que querían moverse en auto hacia transporte público predomina sobre las mayores velocidades del transporte público, y del aumento de utilidad que presenciaban los pocos individuos que todavía están designados para transporte público. La clave es que el número de individuos con estas características es muy bajo en los estratos socioeconómicos más bajos. Además, para esos grupos los tiempos de viaje son menos relevantes que el costo monetario al momento de tomar decisiones. Bajo ese argumento y teniendo en cuenta que gran parte de la población de los grupos 3, 4 y 5 se mueve en auto, es esperable ver que la desutilidad a mayor precio se revierta. Esto es justamente lo que observamos en la tercera imagen de la Figura 11 y la quinta imagen de la Figura 12, donde a ciertos precios de PD (relativamente bajos) existe mayor BS respecto del escenario de referencia. En el grupo 4 se mantiene esta tendencia, pero el precio de utilidad óptima aumenta, y en el grupo 5, la utilidad es creciente en todo el margen de la simulación.

En el óptimo, los grupos económicos que están mejor que en el escenario de referencia son todos los individuos sin auto, y los grupos 4 y 5 con posesión de auto. Los individuos que se mueven en transporte privado y pertenecen a los estratos 1, 2, y 3 tienen un empeoramiento de su condición inicial. Esto señala que un 35.77% de la población (calculado con los datos de la EOD 2012) saldría perjudicado con la política, mientras que el resto tendría beneficios por la aplicación de la política eficiente. Esto claramente no considera otras dimensiones que podrían llevar a que los agentes rechacen una política de este tipo, por ejemplo, debido a una ideología que privilegie la distribución sobre la eficiencia de la aplicación de la política. Hasta este punto solo podemos confirmar que la solución de una política que entrega un peso de 100% a la eficiencia y no se preocupa por la distribución converge en la política de TV con un precio de \$8.000 diarios.

### **Redistribución por transporte público**

Este segundo tipo de redistribución trata de explorar qué tan sensibles son los resultados del óptimo social y de las particiones modales cuando agregamos endógenamente una disminución de la tarifa del transporte público a la decisión de los hogares. Ahora la transferencia no se hace mediante asignaciones del planificador central, sino que opera el equilibrio de mercado y la recaudación pasa directamente a subsidiar el precio del boleto de los buses del transporte público, haciendo más atractiva esta alternativa y beneficiando a gran parte de la población de estratos socioeconómicos más bajos o que no poseen auto. De esta manera, la recaudación se transforma en una variable clave en la decisión de los agentes. En términos económicos, lo que enfrenta la sociedad es una *Curva de Laffer* donde, en un principio, a mayor precio de PD, la recaudación aumenta hasta llegar al punto en que ya muy poca gente está dispuesta a pagar el precio del PD, momento en que la recaudación comienza a disminuir, sobre todo teniendo en cuenta que existe una alternativa de transporte que ha mejorado en costo monetario y tiempos de viajes. Por todo lo anterior, las simulaciones deberían arrojar un mínimo en el precio del transporte público para cierto valor del PD y días de restricción vehicular.

El precio del transporte público diario se calcula de la siguiente forma:

$$P_b = 2,78 \cdot 675 - \frac{\text{Recaudación semanal}}{5 \cdot D_b}$$

Donde 2,78 es la cantidad de viajes diarios que realiza una persona, \$675 es el costo de cada viaje en bus y la recaudación semanal se calcula como la suma de los PD pagados durante una semana. Es decir, la suma de todos los individuos que viajaron en transporte privado más días que los días de restricción

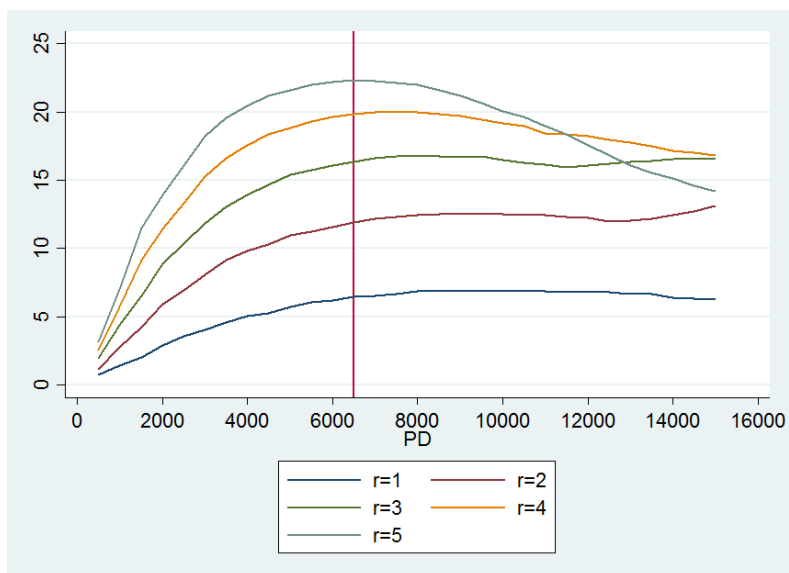
vehicular, o que en TV (cinco días de restricción) se siguen transportando en auto. Se divide por 5 para dejar la recaudación en términos diarios y se divide por  $D_b$  para distribuir los beneficios de la recaudación en todos los usuarios del transporte público.

Los pasos para determinar el óptimo social son los siguientes:

1. Se fija un precio de PD y cantidad de días de RV, lo que determina una recaudación inicial.
2. Se calcula el precio de transporte público y se encuentra el punto fijo, cambiando  $P_b$  acorde al vector de demandas que encuentre cada iteración.
3. Se calculan las utilidades individuales, el  $BS$ , y el valor de  $P_b$  de equilibrio.
4. Se repiten 2 y 3 con un nuevo precio de PD y cantidad de días de RV.

El resultado de la simulación del bienestar social con este método se muestra en la Figura 13. Esta figura indica que el óptimo se alcanza cuando el valor del PD toma un valor de \$6.500 diarios, con una restricción vehicular de cinco días a la semana. Esto quiere decir que nuevamente la solución eficiente es TV, solo que en este esquema el precio que hace que el bienestar llegue a su máximo es ligeramente más bajo.

Figura 13: Bienestar social a distintos días de RV y precios de PD, método de redistribución por asignación

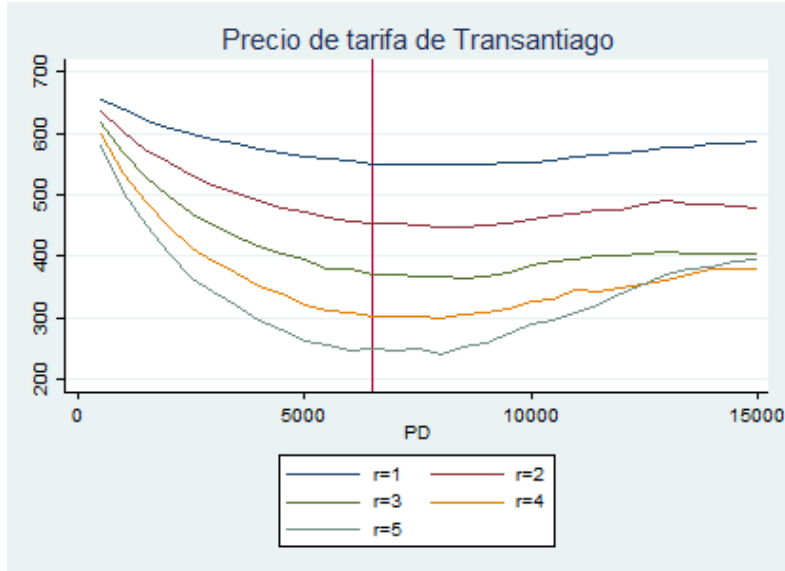


El beneficio de la política óptima con este método de recaudación es ligeramente superior al encontrado en el esquema anterior. Esto es, un beneficio de 3.299 millones de dólares, lo cual representa un 1.36% del PIB nominal chileno para 2017.

La intuición sugiere que, al haber un precio más bajo de transporte público, la elasticidad de uso de transporte público (y la del transporte privado también, pero en sentido contrario) aumenta al punto en que

el beneficio marginal -en términos de velocidad- de subir el PD es mayor que en el enfoque de redistribución por asignación. Básicamente, los efectos de la política a mayor PD son dos: mayor costo de transporte privado y menor costo del transporte público (por mayor recaudación). Ambos van en la misma dirección, lo que explica la mayor elasticidad. No obstante, cuando el PD es muy alto, la recaudación empieza a disminuir, lo que lleva a que el precio del transporte público aumente en conjunto con el aumento del PD. El ejercicio anterior se aprecia en la Figura 14 y el Cuadro 10.

Figura 14: Tarifa del transporte público a distintos días de RV y precios de PD.



El gráfico anterior indica que el óptimo social se encuentra en un valor de PD (\$6.000) que lleva a que el precio del transporte público sea muy cercano a su mínimo alcanzable: \$250 (un 37% del valor actual).

Cuadro 10: Precios del transporte público a distintos días de RV y precio de PD

	0	1	2	3	4	5
\$500	\$675.0	\$655.3	\$635.5	\$616.9	\$598.2	\$579.8
\$1,000	\$675.0	\$637.5	\$601.8	\$568.1	\$535.0	\$503.4
\$1,500	\$675.0	\$621.6	\$571.8	\$527.1	\$488.7	\$451.8
\$2,000	\$675.0	\$609.6	\$551.7	\$498.0	\$448.4	\$403.1
\$2,500	\$675.0	\$598.3	\$530.0	\$470.1	\$413.6	\$365.2
\$3,000	\$675.0	\$588.1	\$513.9	\$451.0	\$392.7	\$342.8
\$3,500	\$675.0	\$582.1	\$502.1	\$431.2	\$373.6	\$319.7
\$4,000	\$675.0	\$574.8	\$490.8	\$416.8	\$351.3	\$296.0
\$4,500	\$675.0	\$568.6	\$478.8	\$403.4	\$340.3	\$281.2
\$5,000	\$675.0	\$562.4	\$473.4	\$393.8	\$319.5	\$260.6
\$5,500	\$675.0	\$559.3	\$461.7	\$380.1	\$310.3	\$256.2
\$6,000	\$675.0	\$554.1	\$456.2	\$379.0	\$307.8	\$245.4
\$6,500	\$675.0	\$550.8	\$452.8	\$370.9	\$303.0	\$250.3
\$7,000	\$675.0	\$550.5	\$452.1	\$371.3	\$302.5	\$245.9
\$7,500	\$675.0	\$549.1	\$448.8	\$367.8	\$302.8	\$250.6
\$8,000	\$675.0	\$548.8	\$448.3	\$367.1	\$298.6	\$240.7
\$8,500	\$675.0	\$548.3	\$446.6	\$362.5	\$305.6	\$253.4
\$9,000	\$675.0	\$549.8	\$450.8	\$368.0	\$308.7	\$259.7
\$9,500	\$675.0	\$551.7	\$454.8	\$374.0	\$315.6	\$273.7
\$10,000	\$675.0	\$553.1	\$458.1	\$384.6	\$327.8	\$288.8

En términos de tráfico en la red vial, la partición modal agregada que resulta de la aplicación de la política eficiente es de 79 % en transporte público (prácticamente la misma que el método de redistribución anterior), con lo que el aumento de 24 % elimina la externalidad que provoca la congestión en el sistema. En este nivel, los distintos estratos socioeconómicos se encuentran con las siguientes particiones modales: el grupo uno tiene un valor de 100 %, el grupo dos aumenta a 99 %, el grupo tres llega a 76 %, el grupo cuatro a 67 %, y el grupo cinco a 23 %. En este margen, las variables de servicio son una velocidad de 30.3 km/hr para el transporte público y 46.8 km/hr para el transporte privado. La partición modal agregada para cada precio y día de restricción y las velocidades de los modos de transporte se encuentran en los anexos 4, 5 y 6 de la tesis. El precio del transporte público se encuentra en el anexo 7.

La dinámica de bienestar intragrupos y al interior de cada grupo se captura en las Figuras 15 y 16, respectivamente.

Figura 15: Bienestar de cada estrato socioeconómico

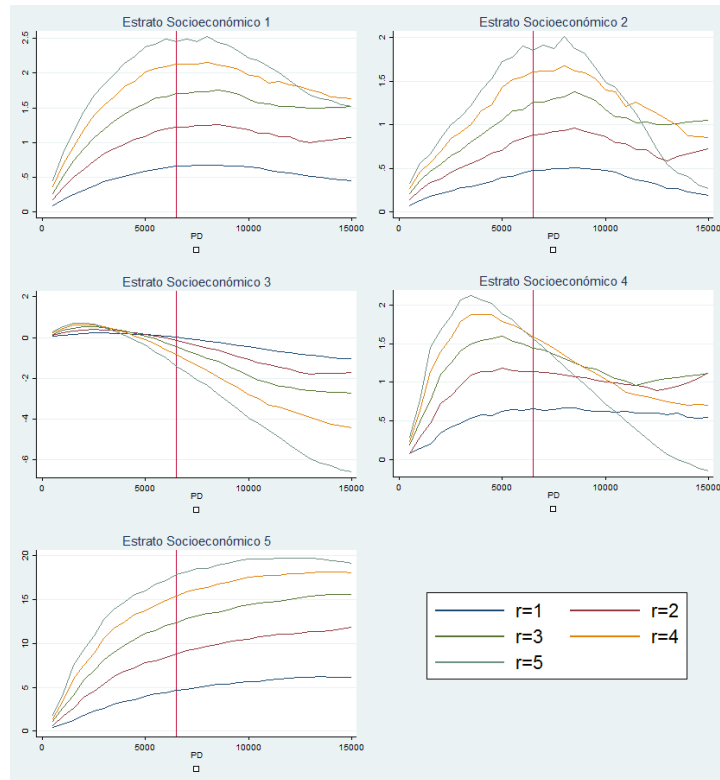
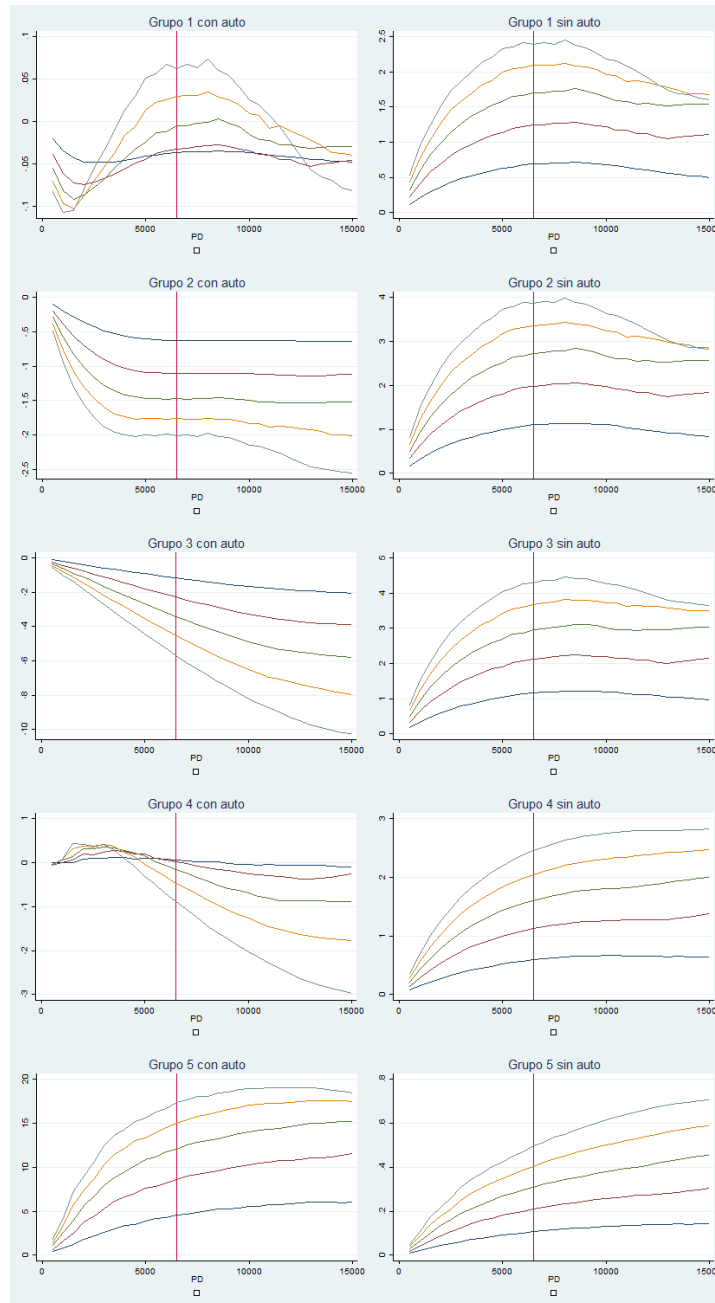


Figura 16: Bienestar dentro de cada estrato socioeconómico, según posesión de auto



De las figuras se desprende que los individuos sin auto de los grupos 1, 2 y 3 están mejor a medida que el precio del PD aumenta, hasta el punto en que la recaudación empieza a disminuir, momento en que el precio del transporte público empieza a caer y, consecuentemente, la utilidad de los individuos también lo hace. Para los grupos 4 y 5 esto no sucede porque el efecto del costo monetario en sus utilidades es muy bajo relativo al peso que tiene el parámetro del tiempo de viaje, por ende, para estos grupos vemos un incremento de utilidad en todo el margen de precios simulados<sup>22</sup>.

<sup>22</sup>El grupo 4 llega a una utilidad relativamente constante para los precios más altos de la simulación.

En este tipo de redistribución, es menos claro que los cambios de utilidad de los grupos provengan solo por el segmento de individuos que poseen auto dentro de cada grupo. De hecho, como ahora también cambia la variable monetaria de los individuos sin auto, el cambio de utilidad de estos individuos es mayor y, por consiguiente, su contribución al bienestar total aumenta.

Dentro de los grupos que poseen auto, ahora se observa una dinámica distinta a la de la redistribución por asignación. Los grupos 1 y 5 tienen aumentos de utilidad en el óptimo respecto del caso de referencia. Los menores precios de transporte público dejan mejor al grupo más pobre y las mayores velocidades mantienen al grupo 5 dentro de los beneficiados por la política. Los grupos 2, 3 y 4 se ven perjudicados. La explicación de esto es que el menor precio del transporte público y su mayor velocidad no son suficientes para compensar la pérdida de utilidad que experimentan los individuos con auto que antes viajaban en transporte privado y ahora no lo pueden hacer debido al precio del PD.

En el agregado, los grupos que están mejor que en su escenario de referencia son los grupos 1, 2, 4 y 5. Desde esta óptica, es mucho más claro que ahora tanto los individuos sin auto como los individuos con auto son relevantes en la determinación del bienestar grupal, pues para los grupos 2 y 4 el efecto mayoritario proviene del incremento de utilidad que perciben los agentes sin auto. Lo anterior señala que un 39.2% de la población (calculado con los datos de la EOD 2012) estaría perjudicado con la aplicación de la política y el resto estaría mejor.

### **Redistribución con transporte público con un 55% de lo recaudado**

Finalmente, en un análisis que trata de acercarse más a lo desarrollado por Basso y Silva (2014) se asume que un 45% de lo recaudado por la política de tarificación por congestión es ocupado en el costo operacional de implementación de la política, con lo que, para disminuir la tarifa del transporte público solo nos queda el 55% de la recaudación.

En esta política, el óptimo se alcanza a un precio del PD de \$5.500, solo mil pesos menos que el encontrado en el esquema anterior con redistribución del total de la recaudación. La partición modal agregada en este caso es de 73%, algo menor a lo observado en los esquemas anteriores. Las dinámicas de bienestar de la sociedad, entre grupos y diferenciando en tenencia de autos, son bastante similares a las mostradas en el caso anterior, por lo que no presento los resultados en esta sección.

Finalmente, cabe destacar que el precio del transporte público al que se llega en el óptimo social es de \$415.3 (un 61.5% del valor actual). En este caso el precio del transporte público difiere del precio que maximiza la recaudación, el cual se encuentra en \$410.7 (a un PD de \$9.000 y RV de cinco días a la semana). El precio del transporte público a cada precio del PD y días de restricción vehicular se encuentra en el anexo 8 de la tesis.

### **4.3. Chequeo de robustez**

En esta sección de la tesis trato de dar validez a mis resultados, variando el valor de los parámetros de la función de tiempo, que determina parte del bienestar de los agentes. La idea de variar esta función es



que los parámetros usados de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $C$ , y los tiempos de flujo libre son sacados de la literatura, pero no son calibrados en la simulación, y por ende, no necesariamente representan el contexto actual que se vive en Santiago de Chile <sup>23</sup>. Utilizar distintos parámetros, por ejemplo, unos que disminuyan la velocidad máxima que puedan alcanzar buses y autos, y por ende, que disminuyan la velocidad que alcanzan a todo nivel de partición modal, es útil para corroborar que los resultados de las estimaciones anteriores son robustos. Para este ejercicio, por motivos de simplicidad, solo muestro los resultados del esquema de redistribución por asignación.

Los parámetros que utilizo para el chequeo de robustez son los siguientes:

Cuadro 11: Parámetros asignados a función de tiempo: chequeo de robustez

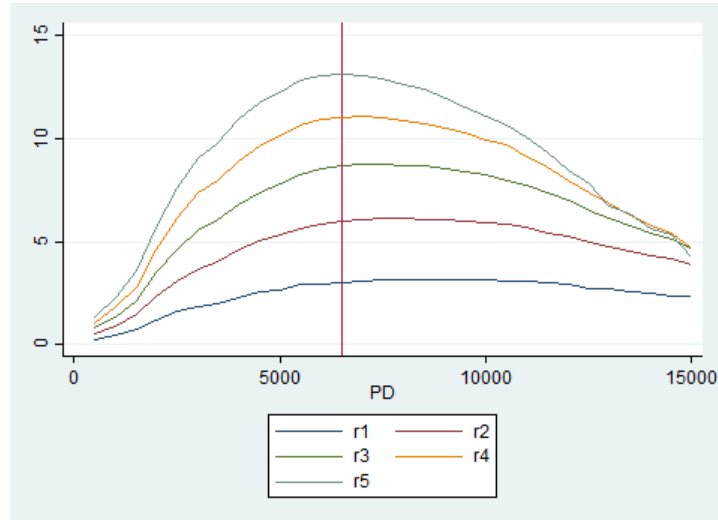
Parámetro	Valor
$a$	1.5
$C$	830
$f_b$	120
$f_c$	80
$\beta_c$	1.8
$\beta_b$	1
$\alpha_c$	0.15
$\alpha_b$	0.225

Por lo tanto, lo que estoy haciendo es cambiar los valores de los parámetros  $C$ ,  $f_b$ , y  $f_c$ , todo el resto se mantienen constantes. Los resultados de las simulaciones de bienestar se observan en la Figura 17 y Figura 18:

---

<sup>23</sup>De hecho, los tiempos de flujo libre se contradicen como la ley de tránsito vigente en Chile, pues la ley permite un máximo de 60 km/hr de velocidad en zona urbana, y por ende, es imposible que un auto se movilice a 60 km/hr, en promedio, por las calles de Santiago (valor que toma el parámetro  $f_c$  en la función).

Figura 17: Bienestar de cada estrato socioeconómico: robustez

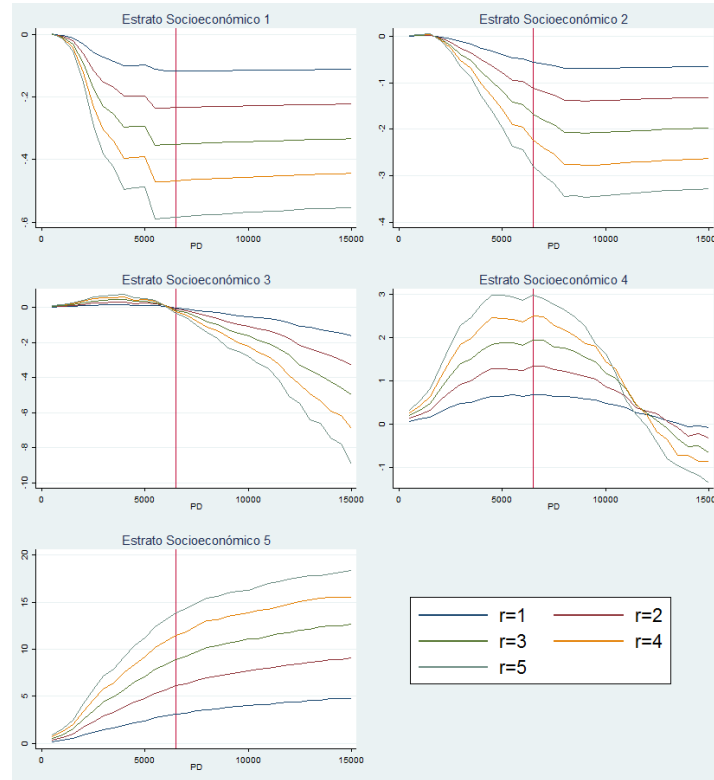


Se observa que la política óptima es TV con un precio de PD de \$6.500, es decir, que con la variación de parámetros se reduce en \$2.500 el cobro de PD en el óptimo. Esto se explica principalmente porque la nueva configuración de la función tiempo lleva a que las velocidades, en el óptimo, bajen, llegando en este caso a 38.8 km/hr para los autos y 23.8 km/hr para los buses, resultado significativamente menor al presentado en la sección anterior para el esquema de asignación. Esto se traduce en que el beneficio de que salga gente del transporte privado para ir al transporte público disminuye, quedando una partición modal de 76 % en el óptimo, cuatro puntos porcentuales menos que lo estimado con los parámetros originales.

Asimismo, el precio óptimo de PD para una política de RVPD, de un día, también baja, quedando en \$8.500 diarios. Esto significaría un cobro de \$4.250 por período *peak* mañana y tarde.

Por último, cabe destacar que las dinámicas de bienestar de los distintos grupos de agentes se mantienen relativamente constantes respecto del análisis con los parámetros originales. Pues, pese a que las curvas están desplazadas levemente hacia la izquierda, las formas de las curvas son las mismas que en el análisis de la sección anterior, resultando en que los favorecidos con la implementación de estas políticas son los individuos de estratos socioeconómicos más ricos, mientras que los grupos uno, dos y tres de la población tienen pérdidas.

Figura 18: Bienestar dentro de cada estrato socioeconómico, según posesión de auto: robustez



Por lo tanto, lo anterior sugiere que los resultados presentados en esta tesis son robustos, y la elección de los parámetros de la función de tiempo no determinan el grueso de los resultados obtenidos. Al contrario, las dinámicas de bienestar tienden a mantenerse relativamente constantes -son poco sensibles-, por lo que diferentes comprensiones de los parámetros que determinan las velocidades del transporte público y privado no debieran hacer caer los resultados de bienestar agregados e intragrupos que se muestran en esta investigación<sup>24</sup>.

#### 4.4. Efectos distributivos

La tarificación por congestión es una de las ideas más debatidas en transporte. Mientras los economistas usualmente defienden esta idea, los conductores y los políticos se oponen bajo la premisa de que el excedente de los consumidores se reduce: los individuos que no manejan se mantienen indiferentes y quienes pagan pueden perder más utilidad si el impacto del precio pagado es mayor que el beneficio producido por los menores tiempos de viaje.

El modelo desarrollado en esta tesis provee un análisis diferente: cuando se aplican los precios de PD y los días de RV el excedente del consumidor puede aumentar a pesar del pago del PD. Esto depende principalmente de la relación que tienen los parámetros  $\lambda_i$  y  $\gamma_i$  al interior de cada grupo. Por otro lado, los

<sup>24</sup>No muestro las dinámicas de bienestar al interior de cada grupo, separando quienes poseen auto y quienes no, pues estas también se mantienen constantes, lo que queda claro con los dos gráficos anteriores.

individuos que no poseen auto o que deciden viajar en bus no están indiferentes a la aplicación de la política; los menores tiempos de desplazamiento producto del menor uso de transporte privado los lleva a beneficiarse con su aplicación. Además, como muestro en la sección anterior, la recaudación que obtiene el gobierno por el cobro del PD puede usarse posteriormente e inducir otros resultados deseables, como disminución de la tarifa del transporte público, transferencias de suma alzada, mejoramiento de la red vial, etc.

No obstante lo anterior, el problema del cálculo del bienestar social que he utilizado hasta ahora es que al sumar dinero estamos ponderando menos la utilidad de los agentes más pobres que la del resto de la población, siendo los más ricos los más ponderados. En esta sección mi objetivo es analizar los pesos que el planificador central les asigna a la eficiencia y a la distribución cuando elige una política distinta a la del óptimo, por ejemplo, una restricción vehicular de un día a la semana con pago de PD. Mi análisis procede de la siguiente forma: considerando que el caso de mayor eficiencia es el de TV, como lo han mostrado las simulaciones hasta ahora, calculo cuál es la ganancia porcentual de los estratos socioeconómicos si se pasa de una situación de TV a una distinta (por ejemplo, un día de restricción con PD). Este cálculo me permite encontrar el peso que le asigna el planificador central a la distribución. En otras palabras, me entrega el valor que está dispuesto a sacrificar de eficiencia en pos de que los estratos socioeconómicos más bajos tengan mayor utilidad.

En este contexto podría evaluar múltiples casos, pero me centro principalmente en dos que son los que me ayudan a ilustrar de mejor forma el efecto distribucional de la política: uno es el de una política como la RVPD que planea implementar el MTT para Chile, que consiste en una restricción vehicular de “x” días a la semana con pago de PD para evitar la restricción. El segundo, una política tradicional de RV sin posibilidad de pago de PD, como rige actualmente en Bogotá. Esta política consiste específicamente en una RV, en promedio, de tres días a la semana -entre lunes y viernes-<sup>25</sup> y se denomina *Pico y Placa*.

Me enfoco solo en el enfoque de redistribución por asignación, puesto que en este caso los individuos de menores ingresos tienen menos utilidad en TV que en los casos híbridos. El enfoque de redistribución de la recaudación por disminución de la tarifa de transporte público tiene como resultado que los individuos pobres están mejor en el óptimo de TV que en los casos híbridos, por lo que sería poco informativo hacer un análisis de ese enfoque en esta sección de la tesis.

El diferencial de utilidades para cada uno de los casos expuestos y el escenario de referencia se muestran en la siguiente tabla:

---

<sup>25</sup>Dadas las características del modelo el PD entra con valor infinito para simular de mejor forma la restricción vehicular en su modo más puro, como es el caso de Bogotá.

Cuadro 12: Diferencia de utilidad con el escenario de referencia para distintas políticas de RVPD

Estrato Socioeconómico	Restricción vehicular		Caso Chile: política híbrida			
	Caso Bogotá	Caso Londres	1 día	2 días	3 días	4 días
$U - U_{ref}$ grupo 1	\$ -75.962,6	\$ -54.734,4	<b>\$ -10.619,2</b>	\$ -21.507,7	\$ -32.422,7	\$ -43.577,6
$U - U_{ref}$ grupo 2	\$ -177.176,5	\$ -336.290,3	<b>\$ -67.528,4</b>	\$ -138.667,5	\$ -206.579,8	\$ -270.535,8
$U - U_{ref}$ grupo 3	\$ -668.712,9	\$ -104.880	<b>\$ -62.973,1</b>	\$ -74.896,8	\$ -112.400,9	\$ -105.414,7
$U - U_{ref}$ grupo 4	\$ -130.787,2	<b>\$ 414.945,9</b>	\$ 65.103,3	\$ 148.631,8	\$ 235.407,3	\$ 328.507,9
$U - U_{ref}$ grupo 5	\$ 922.469,8	<b>\$ 2.161.824,4</b>	\$ 611.628,7	\$ 1.096.629,4	\$ 1.545.851,2	\$ 1.871.202,9

Se aprecia que la máxima utilidad -o menor pérdida- que pueden obtener los individuos del grupo 1, 2 y 3 se encuentra en la política de un día de restricción vehicular con pago de PD, que probablemente sea la que se implemente en Chile en 2017, mientras que los grupos 4 y 5 tienen su mayor beneficio cuando se implementa una política de TV (caso Londres). Es fácil notar que los beneficios agregados obtenidos en TV son mucho mayores que los del resto de las políticas presentadas, lo cual es impulsado principalmente por el beneficio adicional que experimenta el estrato más rico del país. Por último, es importante notar que en el caso de RV tres días a la semana (Bogotá) se aleja significativamente del mejor resultado factible de cada grupo. Esto sucede porque la política es puramente redistribución (equitativa dentro de la población) y no considera ningún componente que le agregue eficiencia a su implementación. Con esta información podemos recobrar las preferencias que el planificador central asigna a la eficiencia y a la distribución en cada caso.

En el cuadro 11 calculo la diferencia de las utilidades que tiene el segmento más pobre de la población (grupos 1 y 2 de ingresos) entre una política particular y la de mayor eficiencia (TV). Además, calculo el diferencial de bienestar social agregado entre la política estudiada y TV. La división del bienestar social ( $BS$ ) de cada política por  $BS_{TV}$  me permite determinar el porcentaje del bienestar que está dispuesto a sacrificar el planificador central en pos de que los individuos más pobres estén mejor que en el *first-best* (resultado de 1 menos aquel ratio). A esto último lo llamo “preferencia por distribución”. La “preferencia por eficiencia” es el ratio anteriormente mencionado. En otras palabras, esto se puede interpretar como una decisión del Ejecutivo, que teniendo disponible la política de TV y con información perfecta de su efecto en la población, prefiere una política que entregue menos bienestar social, con el objetivo de que los individuos del sector socioeconómico bajo estén en mejores condiciones que lo que obtendrían en el escenario de TV.

Cuadro 13: Preferencias por eficiencia y distribución

	Restricción vehicular		Caso Chile: política híbrida			
	Caso Bogotá	1	2	3	4	
$U_{pol}^{pobres} - U_{TV}^{pobres}$	\$ 137.885,52	\$ 312.877,01	\$ 230.849,45	\$ 152.022,14	\$ 76.911,22	
$\Delta BS_{TV} - \Delta BS_{pol.}$	\$ 4.903.244,45	\$ 1.545.254,42	\$ 1.070.676,50	\$ 651.010,57	\$ 300.683,01	
Preferencia por eficiencia ( $\frac{\Delta BS_{pol.}}{\Delta BS_{TV}}$ )	0.0 %	25.7 %	48.5 %	68.7 %	85.6 %	
Preferencia por distribución	100.0 %	74.3 %	51.5 %	31.3 %	14.4 %	

La tabla anterior muestra que una política como la implementada en Bogotá es una que se define como puramente distributiva. Esto sucede porque, producto de su implementación, se deja de ganar el 100 %

de la utilidad que se podría lograr en un escenario de TV ( $BS_{TV} = 2080865,7$ ). Es evidente que en este marco conceptual una política como la desarrollada en Bogotá es indeseable tanto desde una dimensión de eficiencia como desde una distributiva, puesto que aun considerando que el 100% del peso de la política está colocado en distribución, los cuatro primeros segmentos de la población están en peor estado que el escenario de referencia (sin política) y TV es preferida a esta política en el grupo más pobre de la población; solo en el grupo 2 el caso de Bogotá supera a TV. Más aún, es importante destacar que, pese a que en este estudio no considero los efectos de la compra de un segundo auto, la política implementada en Bogotá tiene fuertes incentivos al aumento del parque automotor de acuerdo a la evidencia internacional (GMS 2013), lo que podría acrecentar la pérdida de bienestar social.

Por otro lado, las políticas híbridas muestran una relación creciente entre los días de restricción vehicular -con PD- y la preferencia por eficiencia. En particular, cuando se fija una política híbrida de 1 día de RV, los beneficios desaprovechados llegan a un 74.3% del  $BS_{TV}$ , mientras que, para dos días de RV, la disminución de eficiencia por mayor distribución llega solo a 51.5%, valor que sigue disminuyendo a 31.3% y 14.4% para tres y cuatro días de restricción. Esto quiere decir que en el escenario más probable de implementación de política por parte del MTT, que consta de un día de restricción vehicular con PD, el peso que le estaría asignando a la eficiencia sería de 25.7% y todo el resto de la política se comprende bajo una dimensión distributiva (74.3%) en que el gobierno trata de reducir la pérdida de bienestar que enfrentan los individuos pobres.

Lo anterior es la clave de esta tesis y muestra cómo los gobiernos pueden asignar distintos pesos a la eficiencia y a la distribución para aplicar distintas políticas de transporte. En particular, esto trata de ser un aporte a la discusión clásica acerca del *trade-off* que enfrentan los gobiernos entre eficiencia y distribución.

Cabe destacar que en este estudio mi intención no es hacer juicios de valor sobre qué opción de política es preferible, puesto que eso está en el criterio subjetivo del planificador central. En mi análisis simplemente me limito a determinar cuál es aquel peso implícito que el planificador le asigna a la eficiencia y a la distribución cuando define la política a implementar. Este análisis es propio de la discusión que se está llevando actualmente en Chile sobre la aplicación de la RVPD, y puede generalizarse a cualquier política de transporte que considere RV, TV o híbridos entre aquellas políticas.

## 5. Conclusiones

El *trade-off* entre eficiencia y distribución es un aspecto clave en la discusión de todo tipo de políticas públicas. En particular, en transporte, todo apunta a que la dimensión distributiva ha sido fundamental a la hora de implementar políticas de descongestión vehicular. Esto lo evidencia tanto la experiencia internacional como los resultados que presento en esta investigación.

Mientras una política como TV le entrega 100% del peso a la eficiencia, una de RV pura (como sucede en Bogotá) le deja 0% de peso a esta dimensión y una política de RVPD, de un día, entrega solo un 25.7% de los beneficios que se podrían alcanzar en TV; esto es, a un precio de PD -promedio- de \$5.375 por período *peak* mañana y período *peak* tarde. Sin embargo, esta última política tiene un efecto distributivo

importante, logrando que los individuos más pobres obtengan un bienestar significativamente mayor que bajo un escenario de TV. Esto confirma el hecho de que es posible rediseñar las tradicionales RV para generar una política que se haga cargo tanto de la dimensión distributiva como de la eficiencia, sin descansar en transferencias de suma alzada como la única forma de distribuir los beneficios de la política; asumiendo que, igualmente, existen costos importantes en el grado de eficiencia que se puede alcanzar con la política.

Asimismo, en los resultados de esta tesis, muestro que el esquema de recaudación que se utiliza en el análisis de bienestar es clave para determinar cómo se distribuyen los beneficios de la política, en línea con lo encontrado por Bento et al. (2009). Previa a la redistribución de la recaudación, la RVPD, de un día, es una política regresiva, no obstante, aumenta su regresividad a medida que aumenta el número de días de restricción vehicular con PD -aumenta la pérdida de bienestar de los grupos más pobres y aumenta el bienestar de los más ricos-, poniendo al caso de TV como el más regresivo de todos -5 días a la semana de RVPD-. Sin embargo, posterior a la redistribución de la recaudación, existen esquemas que obtienen un resultado distinto.

En el esquema de *redistribución por asignación* las simulaciones predicen que la política óptima es la de TV, la cual permite que un 64.23% de la población esté mejor que en el escenario de referencia, siendo los individuos perjudicados los que no poseen auto y pertenecen a los grupos socioeconómicos más pobres. En este caso, el precio que maximiza el bienestar social es de \$8.000 diarios, los cinco días de la semana, y logra un beneficio equivalente al 1,19% del PIB nominal chileno. Por otro lado, bajo un esquema de *redistribución por transporte público*, la política óptima también es TV, pero esta vez con un precio de PD de \$6.500, logrando un beneficio equivalente al 1,36% del PIB nominal chileno. La gran diferencia entre los dos enfoques de redistribución es que, en este último, los individuos perjudicados son los pertenecientes a la clase media con auto, y no los más pobres como resulta en el primer caso, obteniéndose que un 61% de la población está mejor con esta política. Esto sugiere que la factibilidad de redistribuir el dinero recaudado hacia fines específicos, es una característica fundamental para el diseño de políticas públicas que consideren logren mejor distribución de sus beneficios, y esto, no es una característica transversal entre los países. De hecho, los ministros de finanzas tienden a rechazar este tipo de prácticas, pues producen poca flexibilidad para generar gasto público.

Algo clave en este sentido, es que una política de este tipo siempre tiene perdedores. Como he mostrado en todos los resultados, no es posible lograr una mejora *paretiana* con este diseño de política. Por lo tanto, pese a que es posible mejorar la distribución de los beneficios de la política, siempre habrá costos para algún grupo de la población.

Finalmente, hay extensiones naturales al modelo teórico que podrían permitir una mejor predicción de los efectos de las políticas: en primer lugar, se puede agregar elección horaria con sustitución entre horas *peak* y fuera *peak*. Esto permitiría comprender mejor la dinámica temporal y agregaría una nueva fuente de elasticidad a las simulaciones. Además, permitiría que el análisis diario deje de tomar los parámetros en “promedios diarios”, lo cual puede crear sesgos en los resultados obtenidos. Una segunda extensión al modelo sería la inclusión de cambios endógenos a ciertas variables de servicio del modelo, como son la frecuencia de los buses y la capacidad máxima de estos. En tercer lugar, se puede hacer endógeno el tamaño del parque

automotor, de manera de hacerse cargo del incentivo que existe a la compra de un nuevo auto, y estudiar cómo eso puede cambiar los resultados obtenidos en el largo plazo. Por último, sería interesante agregarles efecto ingreso a las decisiones de los agentes. En particular, la disponibilidad de ingreso para otros bienes se hace relativamente importante a medida que los individuos tienen menor ingreso socioeconómico. Por esta razón, es esperable que el cobro de un PD una vez a la semana no produzca el mismo efecto que un cobro de un PD del mismo precio dos veces a la semana. La noción es que, a medida que los individuos tienen menores ingresos, el costo monetario debería ser creciente a tasa creciente en la cantidad de días que se pague un PD, lo cual además sería heterogéneo entre individuos de distintos ingresos. Estas cuatro dimensiones las dejo para futuras extensiones de esta investigación.



## Referencias

- [1] Anas, A. y Lindsey, R. (2011). Reducing Urban Road Transportation Externalities: Road Pricing in Theory and in Practice. *Review of Environmental Economics and Policy*, pp. 1–23.
- [2] Arentze, T. Hofman, F. y Timmermans, H. (2004). Predicting Multi-Faceted Activity-Travel Adjustment Strategies In Response To Possible Congestion Pricing Scenarios Using An Internet-Based Stated Adaptation Experiment. *Transport Policy*, Vol. 11, No. 1, January, pp. 31-41.
- [3] Basso, L. y Jara-Díaz, S. (2012). Integrating congestion pricing, transit subsidies and mode choice. *Transportation Research Part A* 46 (2012) 890–900.
- [4] Basso, L. y Silva, H. (2014). Efficiency and Substitutability of Transit Subsidies and Other Urban Transport Policies. *American Economic Journal: Economic Policy* 2014, 6(4): 1–33.
- [5] Barahona, H., Gallego, F. y Montero, J. (2016). Adopting a cleaner technology: The effect of driving restrictions on fleet turnover. Working Paper.
- [6] Beevers, S. y Carslaw, D. The impact of congestion charging on vehicle emissions in London. *Atmospheric Environment* 39 (2005) 1–5.
- [7] Börjesson, M. y Kristoffersson, I. (2015). The Gothenburg congestion charge. Effects, design and politics. *Transportation Research Part A* 75 (2015) 134–146.
- [8] Daganzo, C. (1995). A Pareto optimum congestion reduction scheme. *Transportation Research Part B* Vol. 29, No. 2, pp. 139-154.
- [9] Daganzo, C. (2000). Taking turns: Rx for Congestion. *Access* 17, pp. 14-19.
- [10] Daganzo, C. (1983), Stochastic Network Equilibrium with Multiple Vehicle Types and Asymmetric, Indefinite Link Cost Jacobians. *Transportation Science* 17(3):282-300.
- [11] Davis, L. (2008). The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City. *Journal of Political Economy*, 116(1), 38-81.
- [12] Davis, L., y Knittel, C. (2016). Are fuel economy standards regressive?. NBER Working Paper No. 22925.
- [13] De Grange, L., y Troncoso, R. (2011). Impacts of vehicle restrictions on urban transport flows: the case of Santiago, Chile. *Transport Policy*, 18(6), 862-869.
- [14] Encuesta Origen-Destino 2012. Autor: Universidad Alberto Hurtado, Observatorio Social. Mandante: Sectra. Publicada en 2014.
- [15] Eskeland, G.S. y T.N. Feyzioglu, Is demand for polluting goods manageable? An econometric study of car ownership and use in Mexico, *Journal of Development Economics*, (53): 423-225.
- [16] Gallego, F., Montero, J. y Salas, C. (2013). The effect of transport policies on car use: Evidence from Latin American cities. *Journal of Public Economics* 107 (2013) 47–62.

- [17] Goodwin, P., Dargay, J. y Hanly, M. (2004). Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption With Respect to Price and Income: A Review *Transport Reviews*. Vol. 24, No. 3, May, pp . 275-292.
- [18] Bento, A., Goulder, L., Jacobsen, M., y von Haefen, R. (2009). Distributional and Efficiency Impacts of Increased US Gasoline Taxes. *American Economic Review* 2009, 99:3, 667–699.
- [19] Bovenberg, L. y Goulder, L. (1996). Optimal Environmental Taxation in the Presence of Other Taxes: General-Equilibrium Analyses. *The American Review*.
- [20] Goulder, L. (2013). Climate change policy’s interactions with the tax system. *Energy Economics* 40, 2013, S3–S11.
- [21] Harvey, G. (1994). *Transportation Pricing and Travel Behavior*. Curbing Gridlock, National Academy Press, pp. 89-114.
- [22] Hirshman, I. et al. (1995), “Bridge and Tunnel Toll Elasticities in New York; Some Recent Evidence,” *Transportation*, Vol. 22, pp. 97-113.
- [23] Hymel, K., Small, K., y Van Dender, K. (2010). Induced Demand And Rebound Effects In Road Transport. *Transportation Research B*, Vol. 44, No. 10, December, pp. 1220-1241.
- [24] Konishi, H. (2004). Uniqueness of User Equilibrium in Transportation Networks with Heterogeneous Commuters. *Transportation Science* Vol. 38, No. 3, August 2004, pp. 315–330
- [25] Leape, J. (2016). The London Congestion Charge. *The Journal of Economic Perspectives*, Vol. 20, No. 4 (Fall, 2006), pp. 157-176.
- [26] Levinson, A. Are Energy Efficiency Standards Less Regressive Than Energy Taxes?. Working Paper, 2016.
- [27] Lin, C. Y. C., Zhang, W. y Umanskaya, V. I. (2011). The effects of driving restrictions on air quality: Sao Paulo, Bogotá, Beijing, and Tianjin. In *Agricultural and Applied Economics Association Annual Meeting*.
- [28] Matas, A. y Raymond, J. (2003). Demand Elasticity on Tolled Motorways. *Journal of Transportation and Statistics*, Vol. 6, No. 2/3, pp. 91-108.
- [29] Nie, Y. (2016). Why is License Plate Rationing not a Good Transport Policy?. *Transportmetrica A: Transport Science*.
- [30] OECD (2012). *Ciudades competitivas en la economía global*. OECD territorial reviews.
- [31] OECD/IDB (2014). *Government at a Glance: Latin America and the Caribbean 2014: Towards Innovate Public Financial Management*. OECD publishing.
- [32] Odeck, J. y Brathan, S. (2008). Travel Demand Elasticities And User Attitudes: A Case Study of Norwegian Toll Projects. *Transportation Research A*, Vol. 42, Issue 1, pp. 77-94.
- [33] Palma, A., Lindsey, R., y Proost, S. (2007). Investment and the use of tax and toll revenues in the transport sector. *Research in Transportation Economics*, Vol. 19.

- [34] Parry, I. y Oates, W. (2000). Policy Analysis in the Presence of Distorting Taxes. *Journal of Policy Analysis and Management*, Vol. 19, No. 4. (Autumn, 2000), pp. 603-613.
- [35] Phang, S. y Toh, R. (2004). Road Congestion Pricing in Singapore: 1975 to 2003. *Transportation Journal*, Vol. 43, No. 2 (SPRING 2004), pp. 16-25.
- [36] Paredes, A. (2016). Los efectos de las restricciones temporales en el flujo vehicular. Tesis de magíster de economía.
- [37] Posada, Farbiarz y Gonzalez-Calderón (2011). Análisis del “pico y placa” como restricción a la circulación vehicular en Medellín basado en volúmenes vehiculares. Ed: Universidad Nacional de Colombia v.78 fasc.165 p.112 - 121.
- [38] Rotaris, L., Danielis, R., Marcucci, E. y Massiani, J. (2010). The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost–benefit analysis assessment. *Transportation Research Part A* 44, 2010 359–375.
- [39] Santos, G. y Shaffer, B. (2004). Preliminary results of the London Congestions Charge scheme. *Public Works Management y Policy*, October 2004; vol. 9, 2: pp. 164-181.
- [40] Santos, G. y Shaffer, B. (2007). Urban Congestion Charging: A Comparison between London and Singapore. *Transport Reviews*, 25:5, 511-534.
- [41] Schimek, P. (1997). Gasoline and Travel Demand Models Using Time Series and Cross-Section Data from the United States. *Transportation Research Record* 1558, TRB, pp. 83-89.
- [42] Small, K. y Van Dender, K. (2005). The Effect of Improved Fuel Economy on Vehicle Miles Traveled: Estimating the Rebound Effect Using U.S. State Data, 1966-2001, University of California Energy Institute’s (UCEI) Energy Policy and Economics Working Paper Series.
- [43] Small, K. y Verhoef, E. (2007). *The economics of urban transportation*. Routledge.
- [44] Tsekeris y Voß. (2009). Design and evaluation of road pricing: state-of-the-art and methodological advances. *Netnomics* 10 (1), 5–52.
- [45] West, S. (2004) Distributional Effects of Alternative Vehicle Pollution Control Policies. *Journal of Public Economics*, 2004, 88 (3), 735–757.

## 6. Anexos

### 1. Partición modal agregada: redistribución por asignación

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	0.54	0.54	0.55	0.55	0.55	0.55
\$ 1,000.00	0.54	0.55	0.55	0.55	0.56	0.56
\$ 1,500.00	0.54	0.55	0.56	0.56	0.57	0.58
\$ 2,000.00	0.54	0.55	0.57	0.58	0.59	0.60
\$ 2,500.00	0.54	0.56	0.57	0.59	0.60	0.62
\$ 3,000.00	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64
\$ 3,500.00	0.54	0.57	0.59	0.61	0.63	0.66
\$ 4,000.00	0.54	0.57	0.59	0.62	0.65	0.67
\$ 4,500.00	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.69
\$ 5,000.00	0.54	0.58	0.61	0.64	0.68	0.71
\$ 5,500.00	0.54	0.58	0.62	0.65	0.69	0.73
\$ 6,000.00	0.54	0.58	0.62	0.66	0.70	0.74
\$ 6,500.00	0.54	0.58	0.62	0.67	0.71	0.75
\$ 7,000.00	0.54	0.58	0.63	0.67	0.72	0.77
\$ 7,500.00	0.54	0.59	0.63	0.68	0.73	0.78
\$ 8,000.00	0.54	0.59	0.64	0.69	0.74	0.80
\$ 8,500.00	0.54	0.59	0.64	0.70	0.75	0.81
\$ 9,000.00	0.54	0.59	0.65	0.70	0.76	0.82
\$ 9,500.00	0.54	0.60	0.65	0.71	0.77	0.83
\$ 10,000.00	0.54	0.60	0.66	0.71	0.78	0.84
\$ 10,500.00	0.54	0.60	0.66	0.72	0.78	0.85
\$ 11,000.00	0.54	0.60	0.66	0.73	0.79	0.86
\$ 11,500.00	0.54	0.60	0.67	0.73	0.80	0.87
\$ 12,000.00	0.54	0.60	0.67	0.74	0.81	0.88
\$ 12,500.00	0.54	0.61	0.67	0.74	0.81	0.89
\$ 13,000.00	0.54	0.61	0.68	0.75	0.82	0.90
\$ 13,500.00	0.54	0.61	0.68	0.75	0.83	0.91
\$ 14,000.00	0.54	0.61	0.68	0.76	0.83	0.91
\$ 14,500.00	0.54	0.61	0.68	0.76	0.84	0.92
\$ 15,000.00	0.54	0.61	0.68	0.76	0.84	0.92

### 2. Velocidad del transporte privado: redistribución por asignación

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	29.09	29.14	29.28	29.38	29.48	29.58
\$ 1,000.00	29.09	29.29	29.53	29.74	29.94	30.18
\$ 1,500.00	29.09	29.50	29.96	30.34	30.73	31.14
\$ 2,000.00	29.09	29.72	30.42	31.07	31.67	32.38
\$ 2,500.00	29.09	30.01	30.88	31.78	32.68	33.74
\$ 3,000.00	29.09	30.25	31.42	32.70	33.98	35.31
\$ 3,500.00	29.09	30.45	31.83	33.32	34.83	36.44
\$ 4,000.00	29.09	30.60	32.21	34.05	35.89	37.76
\$ 4,500.00	29.09	30.86	32.72	34.72	36.91	39.15
\$ 5,000.00	29.09	31.05	33.17	35.51	38.06	40.59
\$ 5,500.00	29.09	31.21	33.61	36.17	39.02	42.01
\$ 6,000.00	29.09	31.39	33.96	36.71	39.76	43.04
\$ 6,500.00	29.09	31.53	34.16	37.27	40.56	44.07
\$ 7,000.00	29.09	31.63	34.51	37.79	41.29	45.15
\$ 7,500.00	29.09	31.83	34.92	38.39	42.10	46.24
\$ 8,000.00	29.09	32.02	35.31	39.02	43.11	47.46
\$ 8,500.00	29.09	32.10	35.62	39.50	43.87	48.55
\$ 9,000.00	29.09	32.24	35.85	39.97	44.53	49.37
\$ 9,500.00	29.09	32.36	36.16	40.47	45.19	50.22
\$ 10,000.00	29.09	32.48	36.40	40.93	45.81	51.15
\$ 10,500.00	29.09	32.61	36.70	41.42	46.58	51.99
\$ 11,000.00	29.09	32.75	36.94	41.76	47.17	52.72
\$ 11,500.00	29.09	32.84	37.17	42.25	47.90	53.55
\$ 12,000.00	29.09	32.92	37.43	42.58	48.39	54.02
\$ 12,500.00	29.09	33.04	37.70	42.94	48.84	54.62
\$ 13,000.00	29.09	33.11	37.94	43.40	49.39	55.42
\$ 13,500.00	29.09	33.20	38.12	43.69	49.91	55.94
\$ 14,000.00	29.09	33.24	38.34	44.18	50.56	56.34
\$ 14,500.00	29.09	33.32	38.44	44.28	50.72	56.60
\$ 15,000.00	29.09	33.40	38.53	44.52	51.03	56.80

### 3. Velocidad del transporte público:

#### redistribución por asignación

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	23.99	24.00	24.05	24.09	24.13	24.16
\$ 1,000.00	23.99	24.06	24.14	24.22	24.29	24.37
\$ 1,500.00	23.99	24.13	24.30	24.43	24.56	24.71
\$ 2,000.00	23.99	24.21	24.46	24.68	24.89	25.14
\$ 2,500.00	23.99	24.31	24.62	24.93	25.25	25.62
\$ 3,000.00	23.99	24.40	24.81	25.25	25.70	26.16
\$ 3,500.00	23.99	24.47	24.95	25.47	25.99	26.55
\$ 4,000.00	23.99	24.52	25.08	25.72	26.36	27.01
\$ 4,500.00	23.99	24.61	25.26	25.95	26.71	27.50
\$ 5,000.00	23.99	24.68	25.42	26.23	27.11	28.00
\$ 5,500.00	23.99	24.73	25.57	26.46	27.45	28.51
\$ 6,000.00	23.99	24.80	25.69	26.64	27.71	28.88
\$ 6,500.00	23.99	24.84	25.76	26.84	27.99	29.27
\$ 7,000.00	23.99	24.88	25.88	27.02	28.25	29.67
\$ 7,500.00	23.99	24.95	26.02	27.23	28.54	30.09
\$ 8,000.00	23.99	25.02	26.16	27.45	28.91	30.58
\$ 8,500.00	23.99	25.04	26.27	27.62	29.19	31.02
\$ 9,000.00	23.99	25.09	26.34	27.78	29.44	31.37
\$ 9,500.00	23.99	25.13	26.45	27.96	29.69	31.75
\$ 10,000.00	23.99	25.18	26.54	28.12	29.93	32.17
\$ 10,500.00	23.99	25.22	26.64	28.30	30.23	32.56
\$ 11,000.00	23.99	25.27	26.72	28.42	30.46	32.92
\$ 11,500.00	23.99	25.30	26.80	28.60	30.76	33.36
\$ 12,000.00	23.99	25.33	26.89	28.72	30.96	33.61
\$ 12,500.00	23.99	25.37	26.99	28.85	31.15	33.95
\$ 13,000.00	23.99	25.40	27.07	29.02	31.38	34.44
\$ 13,500.00	23.99	25.43	27.13	29.12	31.61	34.77
\$ 14,000.00	23.99	25.44	27.21	29.31	31.89	35.05
\$ 14,500.00	23.99	25.47	27.24	29.35	31.97	35.24
\$ 15,000.00	23.99	25.49	27.28	29.43	32.11	35.38

### 4. Partición modal agregada: redistribución

#### por transporte público.

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	0.54	0.54	0.55	0.55	0.55	0.56
\$ 1,000.00	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.58
\$ 1,500.00	0.54	0.55	0.57	0.58	0.60	0.62
\$ 2,000.00	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64
\$ 2,500.00	0.54	0.56	0.59	0.61	0.64	0.66
\$ 3,000.00	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.69
\$ 3,500.00	0.54	0.57	0.61	0.64	0.67	0.70
\$ 4,000.00	0.54	0.57	0.61	0.65	0.68	0.72
\$ 4,500.00	0.54	0.58	0.62	0.66	0.70	0.73
\$ 5,000.00	0.54	0.58	0.62	0.67	0.71	0.74
\$ 5,500.00	0.54	0.58	0.63	0.68	0.72	0.76
\$ 6,000.00	0.54	0.59	0.63	0.67	0.73	0.77
\$ 6,500.00	0.54	0.59	0.64	0.69	0.74	0.79
\$ 7,000.00	0.54	0.59	0.64	0.70	0.75	0.80
\$ 7,500.00	0.54	0.59	0.65	0.70	0.76	0.81
\$ 8,000.00	0.54	0.60	0.65	0.71	0.76	0.82
\$ 8,500.00	0.54	0.60	0.66	0.71	0.77	0.83
\$ 9,000.00	0.54	0.60	0.66	0.72	0.78	0.84
\$ 9,500.00	0.54	0.60	0.66	0.73	0.79	0.85
\$ 10,000.00	0.54	0.60	0.67	0.73	0.80	0.86
\$ 10,500.00	0.54	0.60	0.67	0.74	0.81	0.87
\$ 11,000.00	0.54	0.61	0.68	0.74	0.81	0.88
\$ 11,500.00	0.54	0.61	0.68	0.75	0.82	0.89
\$ 12,000.00	0.54	0.61	0.68	0.75	0.83	0.90
\$ 12,500.00	0.54	0.61	0.68	0.76	0.83	0.91
\$ 13,000.00	0.54	0.61	0.69	0.76	0.84	0.91
\$ 13,500.00	0.54	0.61	0.69	0.77	0.84	0.92
\$ 14,000.00	0.54	0.61	0.69	0.77	0.85	0.92
\$ 14,500.00	0.54	0.61	0.70	0.78	0.85	0.93
\$ 15,000.00	0.54	0.61	0.70	0.78	0.86	0.93

**5. Velocidad del transporte privado:  
redistribución por transporte público.**

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	28.91	29.15	29.29	29.58	29.79	30.02
\$ 1,000.00	28.91	29.40	29.89	30.50	31.05	31.57
\$ 1,500.00	28.91	29.62	30.46	31.42	32.64	33.81
\$ 2,000.00	28.91	29.99	31.24	32.57	33.88	35.27
\$ 2,500.00	28.91	30.26	31.71	33.40	35.03	36.78
\$ 3,000.00	28.91	30.48	32.31	34.35	36.46	38.63
\$ 3,500.00	28.91	30.77	32.94	35.14	37.64	40.05
\$ 4,000.00	28.91	30.99	33.40	35.87	38.53	41.17
\$ 4,500.00	28.91	31.13	33.75	36.57	39.59	42.44
\$ 5,000.00	28.91	31.38	34.26	37.31	40.20	43.29
\$ 5,500.00	28.91	31.59	34.51	37.74	41.08	44.59
\$ 6,000.00	28.91	31.71	34.88	38.42	42.02	45.50
\$ 6,500.00	28.91	31.89	35.25	38.91	42.80	46.81
\$ 7,000.00	28.91	32.03	35.63	39.54	43.63	47.68
\$ 7,500.00	28.91	32.18	35.92	40.01	44.38	48.72
\$ 8,000.00	28.91	32.36	36.22	40.46	44.94	49.24
\$ 8,500.00	28.91	32.48	36.48	40.81	45.73	50.31
\$ 9,000.00	28.91	32.56	36.83	41.31	46.36	51.11
\$ 9,500.00	28.91	32.68	37.08	41.88	47.05	52.03
\$ 10,000.00	28.91	32.80	37.34	42.36	47.84	52.88
\$ 10,500.00	28.91	32.88	37.66	42.81	48.30	53.43
\$ 11,000.00	28.91	33.04	37.87	43.12	48.94	54.09
\$ 11,500.00	28.91	33.11	38.14	43.47	49.30	54.70
\$ 12,000.00	28.91	33.22	38.29	43.92	49.92	55.31
\$ 12,500.00	28.91	33.32	38.48	44.40	50.42	55.87
\$ 13,000.00	28.91	33.39	38.74	44.87	50.94	56.34
\$ 13,500.00	28.91	33.47	38.90	45.22	51.37	56.67
\$ 14,000.00	28.91	33.46	39.13	45.56	51.87	56.89
\$ 14,500.00	28.91	33.49	39.40	45.91	52.20	57.16
\$ 15,000.00	28.91	33.55	39.74	46.14	52.47	57.34

**6. Velocidad del transporte público:  
redistribución por transporte público.**

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	23.92	24.01	24.06	24.16	24.23	24.32
\$ 1,000.00	23.92	24.10	24.27	24.49	24.68	24.86
\$ 1,500.00	23.92	24.17	24.47	24.81	25.23	25.64
\$ 2,000.00	23.92	24.30	24.74	25.21	25.66	26.14
\$ 2,500.00	23.92	24.40	24.91	25.50	26.06	26.67
\$ 3,000.00	23.92	24.48	25.12	25.83	26.56	27.31
\$ 3,500.00	23.92	24.58	25.34	26.10	26.97	27.81
\$ 4,000.00	23.92	24.66	25.49	26.35	27.28	28.21
\$ 4,500.00	23.92	24.71	25.62	26.59	27.65	28.67
\$ 5,000.00	23.92	24.79	25.79	26.85	27.86	28.98
\$ 5,500.00	23.92	24.87	25.88	27.00	28.18	29.46
\$ 6,000.00	23.92	24.91	26.01	27.24	28.52	29.81
\$ 6,500.00	23.92	24.97	26.14	27.41	28.80	30.32
\$ 7,000.00	23.92	25.02	26.27	27.63	29.10	30.67
\$ 7,500.00	23.92	25.07	26.37	27.80	29.38	31.10
\$ 8,000.00	23.92	25.13	26.47	27.95	29.59	31.32
\$ 8,500.00	23.92	25.18	26.56	28.08	29.90	31.78
\$ 9,000.00	23.92	25.21	26.68	28.26	30.14	32.15
\$ 9,500.00	23.92	25.25	26.77	28.46	30.41	32.58
\$ 10,000.00	23.92	25.29	26.86	28.64	30.73	33.01
\$ 10,500.00	23.92	25.32	26.97	28.80	30.92	33.29
\$ 11,000.00	23.92	25.37	27.05	28.92	31.19	33.65
\$ 11,500.00	23.92	25.40	27.14	29.04	31.34	34.00
\$ 12,000.00	23.92	25.43	27.19	29.21	31.61	34.37
\$ 12,500.00	23.92	25.47	27.26	29.39	31.83	34.73
\$ 13,000.00	23.92	25.49	27.35	29.57	32.07	35.05
\$ 13,500.00	23.92	25.52	27.40	29.70	32.27	35.28
\$ 14,000.00	23.92	25.52	27.49	29.83	32.51	35.45
\$ 14,500.00	23.92	25.53	27.58	29.96	32.67	35.66
\$ 15,000.00	23.92	25.55	27.70	30.06	32.80	35.80

**7. Precio de transporte público: enfoque de redistribución por transporte público con**

**100 % de la recaudación**

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	675.00	655.26	635.52	616.86	598.15	579.84
\$ 1,000.00	675.00	637.50	601.77	568.06	534.97	503.36
\$ 1,500.00	675.00	621.61	571.84	527.14	488.68	451.83
\$ 2,000.00	675.00	609.61	551.65	497.96	448.44	403.12
\$ 2,500.00	675.00	598.31	529.95	470.08	413.59	365.21
\$ 3,000.00	675.00	588.12	513.90	451.01	392.74	342.79
\$ 3,500.00	675.00	582.10	502.06	431.25	373.62	319.65
\$ 4,000.00	675.00	574.79	490.83	416.84	351.35	296.01
\$ 4,500.00	675.00	568.64	478.82	403.43	340.33	281.15
\$ 5,000.00	675.00	562.44	473.43	393.78	319.53	260.62
\$ 5,500.00	675.00	559.28	461.67	380.12	310.31	256.18
\$ 6,000.00	675.00	554.12	456.22	378.98	307.82	245.37
\$ 6,500.00	675.00	550.81	452.83	370.94	302.98	250.31
\$ 7,000.00	675.00	550.46	452.09	371.26	302.54	245.93
\$ 7,500.00	675.00	549.14	448.78	367.76	302.84	250.61
\$ 8,000.00	675.00	548.84	448.27	367.07	298.56	240.72
\$ 8,500.00	675.00	548.25	446.58	362.53	305.59	253.36
\$ 9,000.00	675.00	549.81	450.78	367.98	308.67	259.68
\$ 9,500.00	675.00	551.66	454.78	374.00	315.55	273.68
\$ 10,000.00	675.00	553.14	458.06	384.61	327.79	288.82
\$ 10,500.00	675.00	555.66	466.09	392.94	330.10	294.36
\$ 11,000.00	675.00	561.52	467.76	394.53	345.94	307.25
\$ 11,500.00	675.00	565.20	475.83	401.05	342.83	320.46
\$ 12,000.00	675.00	568.21	475.79	400.93	349.27	337.58
\$ 12,500.00	675.00	571.83	484.95	404.27	355.01	354.80
\$ 13,000.00	675.00	577.02	489.86	405.89	362.06	369.96
\$ 13,500.00	675.00	577.93	485.29	405.10	368.37	378.69
\$ 14,000.00	675.00	582.40	483.24	403.49	377.75	382.42
\$ 14,500.00	675.00	583.95	480.55	403.84	378.99	391.37
\$ 15,000.00	675.00	586.52	478.38	402.83	380.66	394.86

**8. Precio de transporte público: enfoque de redistribución por transporte público con**

**55 % de la recaudación**

Días de RV	0	1	2	3	4	5
\$ 500.00	675.00	664.11	653.45	642.70	632.36	622.54
\$ 1,000.00	675.00	654.06	634.11	614.61	595.91	577.70
\$ 1,500.00	675.00	644.98	616.67	589.58	564.04	540.37
\$ 2,000.00	675.00	637.39	602.76	570.32	541.41	513.28
\$ 2,500.00	675.00	630.80	590.69	553.01	516.91	484.40
\$ 3,000.00	675.00	624.14	579.10	538.33	501.08	468.42
\$ 3,500.00	675.00	619.36	570.03	525.91	485.62	452.19
\$ 4,000.00	675.00	614.49	562.75	516.30	474.71	437.76
\$ 4,500.00	675.00	611.34	555.46	507.54	464.17	426.21
\$ 5,000.00	675.00	608.15	549.52	497.91	455.72	416.49
\$ 5,500.00	675.00	605.36	547.42	496.21	452.50	415.32
\$ 6,000.00	675.00	605.43	545.92	492.31	447.77	408.44
\$ 6,500.00	675.00	602.84	542.21	489.06	441.54	403.01
\$ 7,000.00	675.00	601.26	539.13	485.85	439.26	403.74
\$ 7,500.00	675.00	601.17	538.84	485.88	440.33	403.37
\$ 8,000.00	675.00	600.10	537.67	487.60	443.21	408.44
\$ 8,500.00	675.00	601.99	539.78	487.86	441.79	411.07
\$ 9,000.00	675.00	602.18	541.49	488.69	446.91	410.73
\$ 9,500.00	675.00	603.06	540.78	486.71	443.57	411.75
\$ 10,000.00	675.00	603.94	543.04	494.18	454.00	424.04
\$ 10,500.00	675.00	606.74	548.53	499.69	463.68	436.04
\$ 11,000.00	675.00	609.03	553.50	504.17	471.42	446.55
\$ 11,500.00	675.00	611.51	560.29	517.10	483.80	465.78
\$ 12,000.00	675.00	615.58	566.87	523.13	491.26	470.67
\$ 12,500.00	675.00	617.77	568.41	523.76	495.98	478.70
\$ 13,000.00	675.00	620.40	573.23	534.52	507.54	489.98
\$ 13,500.00	675.00	622.70	578.56	540.41	510.31	502.34
\$ 14,000.00	675.00	624.08	581.55	544.06	514.71	509.96
\$ 14,500.00	675.00	624.96	585.62	545.74	519.68	525.47
\$ 15,000.00	675.00	631.76	589.08	547.05	522.07	533.62