

MODELOS DE ELECCIÓN DISCRETA APLICADOS A DATOS SIMULADOS COMO APROXIMACIÓN A UN MODELO DE TRANSPORTE PARA LA CIUDAD DE LA PAZ

Lic. Paredes Alarcón, Marisol¹

✉ marycorreo7@yahoo.es

RESUMEN

Este documento desarrolla modelos estadísticos de elección discreta, mediante la comparación de modelos multinomial logit y probit, a fin de diseñar un modelo para el modo de transporte elegido por los habitantes de la ciudad de La Paz, con el auxilio de datos simulados basados en fuentes provenientes de encuestas a hogares sobre los viajes. Al ser las encuestas de hogares una de las formas convencionales de recolección de información pero bastante costosas, se propicia el uso de datos simulados. Los resultados alcanzados señalan que los costos, el tiempo de espera del tramo y el tiempo de duración del tramo, son determinantes en la elección del modo de transporte para los habitantes de la ciudad de La Paz, a diferencia de las variables sociodemográficas. El modelo multinomial logit alcanzado enfatiza modos de transporte más económicos como los elegidos por la población, como el ir a pie, y también aquellos que a pesar del tiempo de espera para su abordaje, proporcionan una forma más eficiente, segura y rápida de transporte como son las nuevas modalidades de Pumakatari y Teleférico. En tanto que en el lado opuesto y con la menor probabilidad de ser elegidos se tiene al minibús y carry, seguido del micro, bus, microbús, que incitan a un mejoramiento de su capacidad técnica y propuesta económica para ofrecer un mejor servicio a la ciudadanía.

PALABRAS CLAVE

Modelos de transporte; modelo logit; modelo probit, simulación

ABSTRACT

This document develops statistical models of discrete choice, by comparing logit and probit multinomial models, in order to design a model for the mode of transport chosen by the inhabitants of the city of La Paz, with the help of related simulated data in sources from household surveys on travel. Since household surveys are one of the ways of collecting information but quite expensive, it is encouraged to use simulated data. The results obtained indicate that the costs, the waiting time of the section and the duration of the section, are decisive in the choice of the mode of transport for the inhabitants of the city of La Paz, a difference of the sociodemographic variables. The improved multinomial logistics model emphasizes more economical modes of transport such as those chosen by the population, such as going to a cake, and also those that weigh the waiting time for boarding, specifically a more efficient, safe and faster way of transport such as they are the new modalities of Pumakatari and Cable Car. While on the opposite side and with the least probability of being chosen, you have the minibuss and take, followed by the micro, bus, minibuss, which encourage an improvement of your technical capacity and economic proposal to offer a better service to the citizens

KEYWORDS

Transport models; logit model; probit model, simulation

1. INTRODUCCIÓN

La planificación del transporte en las grandes ciudades resulta en la actualidad un ámbito de investigación sumamente importante, particularmente en la toma de decisiones y la elaboración de políticas de transporte urbano. Una forma de abordar este problema se realiza por medio de modelos de transporte, que requieren de diversas técnicas estadísticas para su aproximación.

El transporte urbano es uno de los factores fundamentales para el desarrollo económico y social de la ciudad de La Paz y el área metropolitana, ya que más del 70% de la población depende de este medio de movilización para realizar sus actividades diarias de trabajo, educación, compras, etc. Por ello es que el interés en esta investigación se centra en el estudio de un modelo de transporte para la ciudad de La Paz.

Sin embargo, estos modelos pueden ser desarrollados tanto desde el punto de vista de la oferta como de la demanda de transporte. En el segundo caso, los modelos de demanda de transporte utilizados en la planificación se basan exclusivamente en formas convencionales de recolección de información, como son las encuestas por muestreo, efectuadas a los hogares respecto de los viajes realizados. Toda esta información estadística bastante costosa, persigue, como fin último, el diseño de un modelo de transporte para la ciudad bajo estudio.

La teoría desarrollada sobre los modelos de transporte surge en 1960 (de Dios Ortúzar y Willumsen, 2011), originalmente especificados como modelos basados en viajes, supone la realización de cuatro pasos. Este modelo trabaja sobre la hipótesis de que los usuarios realizan secuencialmente un conjunto de elecciones que caracterizan sus

viajes, a base de ciertos atributos personales y del sistema de transporte. Estas elecciones dicen la relación con las decisiones de viajar (paso 1, generación de viajes) hasta un destino (paso 2, distribución de viajes) en un modo de transporte (paso 3, partición modal) y a través de una ruta determinada (paso 4, asignación). La agregación de estas decisiones individuales determina las características de operación de un sistema de transporte dado.

El requisito para el modelado de estos cuatro pasos prevé la realización de encuestas por muestreo efectuadas a los hogares, cuya ejecución supone un elevado costo. Sin embargo, en los últimos años, se han realizado investigaciones a fin de propiciar el uso de datos simulados basados en encuestas por muestreo de viajes efectuados a hogares, a fin de aprovechar otro tipo de aproximaciones para calcular modelos de transporte que permitan trabajar con escenarios hipotéticos.

Para realizar esta aproximación, se utiliza los resultados de la Encuesta municipal de movilidad intraurbana en la Región Metropolitana de La Paz publicado por el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP), que se llevó a cabo de septiembre a octubre del 2014 en los macrodistritos urbanos de La Paz y El Alto y en los municipios de Palca, Mecapaca, Achocalla, Viacha, Pucarani y Laja, con un total de muestra de 1.820 hogares. Estos resultados proporcionan descripciones sociodemográficas de los hogares, que cubren atributos tales como composición del hogar, nivel socioeconómico, ocupación principal, tiempos por persona, tiempos por tramo, modo de transporte, gasto en transporte, entre otros. Esta información se utiliza como datos de entrada necesarios para aproximar los datos simulados, combinados con alguna información complementaria acerca del modo de transporte, los costos de

Modelos de elección discreta aplicados a datos simulados como aproximación un modelo de transporte para la ciudad de La Paz

pasajes actualizados y la introducción del nuevo medio de transporte por teleférico.

La forma de abordar el tratamiento de la información simulada se puede realizar con modelos estadísticos de elección discreta, en la que las opciones de elección son múltiples (por ejemplo ir a pie, o tomar un micro o minibús). En este tipo de modelos de elección discreta se trabaja con los modelos Multinomial Logit (MNL), pero otra aproximación interesante es la de los modelos Multinomial Probit (MNP).

Los resultados sugieren que la construcción de modelos de elección discreta utilizando la simulación basada en encuestas por muestreo es efectiva para analizar el comportamiento de los pasajeros por medio de un modelo de transporte y puede usarse para estudiar el impacto de las políticas de gestión de la demanda en la ciudad de La Paz.

2. OBJETIVO

El objetivo general de esta investigación es desarrollar modelos estadísticos de elección discreta, mediante el Modelo Multinomial Logit (MNL), Modelo Multinomial Probit (MNP), a fin de diseñar un modelo de transporte para la ciudad de La Paz, con el auxilio de datos simulados basados en fuentes provenientes de encuestas a hogares sobre los viajes.

La pregunta de investigación intenta aproximar los patrones y características de la movilidad intraurbana en el municipio de La Paz desde el punto de vista de la demanda.

3. METODOLOGÍA

El caso del transporte en la ciudad de La Paz, se pudo analizar desde la perspectiva de trabajo con modelos de elección discreta, con un conjunto de opciones de más de dos

alternativas. La elección de un individuo sobre el modo de transporte en nuestra ciudad (por ejemplo micro, taxi, minibús) es un problema de elección discreta múltiple. El enfoque que se usa para modelar elecciones discretas se basa en la teoría de la utilidad aleatoria, donde para cada una de las alternativas existentes, el individuo tiene una función de utilidad asociada, donde elige aquella alternativa que maximiza su utilidad. La función se divide en un componente determinístico y un componente aleatorio.

En este tipo de modelos de elección discreta se trabaja con los modelos Multinomial Logit (MNL), que requieren como supuesto la Independencia de Alternativas Irrelevantes (IIA), esto es independencia entre alternativas, que corresponde a establecer que los términos de error relativos a las utilidades no están correlacionadas entre sí. Debido a que este supuesto no se verifica en la mayoría de los casos, otra aproximación interesante es la de los modelos Multinomial Probit (MNP), donde la suposición es la de asumir que los errores están distribuidos de forma normal multivariante, esto puede permitir la correlación entre alternativas y las varianzas distintas entre las alternativas. Para éste último caso el inconveniente mayor es el de evaluar integrales múltiples, pero en la actualidad con la ayuda de software apropiado se pueden obtener los valores de las integrales por medio de simulaciones.

Sin embargo, analizar el comportamiento de los modelos de elección discreta para el caso del transporte en la ciudad de La Paz, requirió además comprender los determinantes más importantes y las relaciones que explican las decisiones para realizar los viajes. Por ello es que la Encuesta Municipal de movilidad intraurbana en la región metropolitana de La Paz realizada por el GAMLP recogió información de otros factores tales como variables sociodemográficas, el número de

viajes, tiempos, tramos, gastos de transporte entre otros.

3.1. PREFERENCIAS DECLARADAS Y REVELADAS

En la teoría económica desarrollada sobre el transporte, desde el punto de vista de la demanda, se la enfoca tradicionalmente en el empleo de las preferencias reveladas y las preferencias declaradas, o bien una combinación de ambas.

Datos con preferencias reveladas, significa que los datos recolectados son elecciones observadas de individuos, como en nuestro caso del modo de transporte (micro, minibús, taxi, etc.). En esta situación el individuo ya optó por un modo de transporte, y la encuesta recoge información sobre las características relacionadas a este modo de transporte que ha sido utilizado efectivamente. Datos con preferencias declaradas, significa que los individuos son enfrentados a una situación de elección, por ejemplo, la elección de un nuevo tramo de la ruta del teleférico, con nuevos precios y características en su recorrido. En resumen, se habla de preferencias reveladas cuando se observa el comportamiento real de los usuarios, por ejemplo, el medio de transporte utilizado, y de preferencias declaradas o establecidas cuando se obtienen respuestas de los individuos ante situaciones de elección hipotéticas.

Por ello, para la construcción misma del modelo tomaremos el comportamiento de las preferencias declaradas obtenidas en la encuesta, a fin de simular las respuestas para la estimación del modelo de transporte, en la que las principales variables explicativas utilizadas habitualmente son el costo del transporte, el tiempo de espera, el tiempo de duración del viaje y el nivel socioeconómico del usuario.

3.2. MODELO MULTINOMIAL LOGIT

El modelo de elección discreta más sencillo y mayormente utilizado es el logit. Su popularidad se debe al hecho de que la fórmula para las probabilidades de elección toma una forma cerrada y se interpreta más fácilmente.

De forma general el modelo logit considera que un individuo se enfrenta a J alternativas. Se define una utilidad U para cada alternativa y se supone que el individuo elige la alternativa con el más alto nivel de utilidad. La utilidad U que obtiene el tomador de decisiones de la alternativa j se descompone en:

$$\begin{cases} U_1 = \beta_1^T x_1 + \varepsilon_1 = V_1 + \varepsilon_1 \\ U_2 = \beta_2^T x_2 + \varepsilon_2 = V_2 + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ U_j = \beta_j^T x_j + \varepsilon_j = V_j + \varepsilon_j \end{cases}$$

La alternativa k será elegida si y solo si para cualquier $j \neq k$, $U_k > U_j$, lo que nos guía a las siguientes $k-1$ condiciones:

$$\begin{cases} U_k - U_1 = (V_k - V_1) + (\varepsilon_k - \varepsilon_1) > 0 \\ U_k - U_2 = (V_k - V_2) + (\varepsilon_k - \varepsilon_2) > 0 \\ \vdots \\ U_k - U_j = (V_k - V_j) + (\varepsilon_k - \varepsilon_j) > 0 \end{cases}$$

Como los errores ε_j no son observados, las $j-1$ condiciones pueden ser reescritas en términos de los límites superiores de los $j-1$ errores restantes:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 < (V_k - V_1) + \varepsilon_k \\ \varepsilon_2 < (V_k - V_2) + \varepsilon_k \\ \vdots \\ \varepsilon_j < (V_k - V_j) + \varepsilon_k \end{cases}$$

La expresión general para la probabilidad de elegir la alternativa k es:

$$(P_k \setminus \varepsilon_k) = P(U_k > U_1, \dots, U_k > U_j)$$

Modelos de elección discreta aplicados a datos simulados como aproximación un modelo de transporte para la ciudad de La Paz

Note que esta probabilidad es condicional sobre el valor de ε_k . Se debe aplicar una integral para obtener el valor de la probabilidad incondicional que depende solamente de β y sobre el valor de las variables explicativas.

Para el modelo multinomial logit aplicado a nuestro problema de transporte, se considera que tenemos i individuos que realizan su elección de transporte, y se enfrenta a j alternativas. La utilidad U que obtiene el tomador de decisiones de la alternativa j se descompone en:

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} ; \forall j$$

Que consiste en una parte denominada V_{ij} que es un conjunto de variables (por ejemplo costo del transporte, tiempo de espera, etc.) conocidas, y una parte desconocida ε_{ij} que es tratada como aleatoria. El modelo multinomial logit se obtiene suponiendo que cada ε_{ij} se distribuye de forma independiente e idénticamente distribuidas.

Para ejemplificarlo, supongamos que en una situación sobre un modo de transporte elegido por un individuo entre micro, minibús y taxi, podemos asociar la utilidad como un índice de satisfacción V_j que depende de forma lineal de un costo (x) y el tiempo (y):

$$\begin{cases} V_1 = \alpha_1 + \beta x_1 + \gamma y_1 \\ V_2 = \alpha_2 + \beta x_2 + \gamma y_2 \\ V_3 = \alpha_3 + \beta x_3 + \gamma y_3 \end{cases}$$

En este caso, la probabilidad de la elección de la alternativa j aumenta con V_j . Para fines de la estimación, se debe transformar el índice de satisfacción, ya que puede tomar cualquier valor real, de tal forma que sea restringido al intervalo unitario y se pueda interpretar como una probabilidad. El modelo multinomial logit se obtiene aplicando esta transformación a los V_j . MacFadden (1974) ha demostrado que las correspondientes probabilidades están dadas por:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V_2} + e^{V_3}} \\ P_2 = \frac{e^{V_2}}{e^{V_1} + e^{V_2} + e^{V_3}} \\ P_3 = \frac{e^{V_3}}{e^{V_1} + e^{V_2} + e^{V_3}} \end{cases}$$

Donde cada una de las P_j con $j=1, 2, 3$ están entre cero y uno y la suma de ellas es igual a la unidad. Esta es la forma general de la función de distribución logística, y expresa la probabilidad de que un individuo escoja la alternativa j .

Esta elección discreta que realiza un individuo entre los tres medios de transporte, utiliza además el principio de maximización de la utilidad, suponiendo que el individuo, al tomar la decisión sobre un determinado medio de transporte dentro de un conjunto de alternativas disponibles, está eligiendo también alcanzar su máximo nivel de utilidad.

3.3. MODELO MULTINOMIAL PROBIT

La ventaja del MNP sobre MNL es que MNP no asume Independencia de Alternativas Irrelevantes (IIA), esto es independencia entre alternativas, que corresponde a establecer que los términos de error relativos a las utilidades no están correlacionadas entre sí. El modelo multinomial probit (MNP) se obtiene con el mismo modelo que utilizamos cuando se presentó el modelo de utilidad aleatoria. La utilidad de una alternativa aún es la suma de los dos componentes:

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} ; \forall j$$

Pero la distribución conjunta de los términos de error ahora es una normal multivariante con media 0 y con una matriz de covarianza denotada con Ω .

La elección de probabilidades utilizando MNP es muy compleja. En la mayoría de las situaciones, las distribuciones normales proporcionan una representación adecuada

de los componentes aleatorios. Sin embargo, en otras ocasiones, las distribuciones son inapropiadas y pueden llevar a pronósticos incongruentes.

Debido a que se trabaja con una distribución normal multivariante, una función muy difícil de integrar, las computadoras presentan dificultades en el tiempo de cálculo o en la estimación de múltiples integrales, por ésta razón deben evaluarse numéricamente a través de simulaciones. Se utilizan varios procedimientos de simulación y pueden ser efectivos en ciertas circunstancias. Los métodos de cuadratura aproximan la integral por una función ponderada de puntos elegidos para evaluar. La cuadratura opera efectivamente cuando la dimensión de la integral es pequeña, pero no con dimensiones más altas. Se han propuesto numerosos simuladores para modelos probit; el principal simulador es el simulador de GHK, por las iniciales de los autores Geweke, Hajivassiliou y Keane que es, con mucho, el simulador de probit más utilizado y el más preciso.

3.4 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL PAQUETE MLOGIT DE R

El software R presenta entre sus versatilidades la amplia variedad de librerías, una de ellas es el paquete mlogit que permite la estimación de modelos logit y probit multinomiales con variables específicas individuales y/o alternativas.

En el modelo propuesto se trabajó con variables individuales, es decir propias de cada persona que elige un modo de transporte, como ser el nivel socioeconómico. En cambio hay otro tipo de variables denominadas alternativas que se relacionan directamente a la elección del modo de transporte de cada individuo, como ser el tiempo de espera, el costo del modo de transporte, y el tiempo del recorrido o viaje.

Cuando se trabaja con modelos logit multinomiales, uno tiene que considerar tres tipos de variables:

- Variables específicas alternativas x_{ij} con un coeficiente genérico β .
- Variables específicas individuales z_i con un coeficiente específico alternativo γ_j .
- Variables específicas alternativas w_{ij} con un coeficiente específico alternativo δ_j .

El índice de satisfacción para la alternativa j es entonces:

$$V_{ij} = \alpha_j + \beta x_{ij} + \gamma_j z_i + \delta_j w_{ij}$$

Un modelo solamente con variables específicas individuales a veces se denomina modelo logit multinomial, uno solo con variables específicas alternativas un modelo logit condicional y uno con ambos tipos de variables un modelo logit mixto. Sin embargo esto puede resultar engañoso: el modelo logit condicional también es un modelo logit para datos longitudinales en la literatura estadística y el logit mixto es uno de los nombres de un modelo logit con parámetros aleatorios. Por lo tanto, en lo que sigue, se utiliza el nombre logit multinomial para el modelo que se acaba de describir cualquiera que sea la naturaleza de las variables explicativas incluidas en el modelo.

Los coeficientes del modelo multinomial logit son estimados mediante el método de máxima verosimilitud. Bajo ciertas condiciones de regularidad, el estimador máximo verosímil es consistente y tiene una distribución normal asintótica. Actualmente se usan dos tipos de rutinas para la estimación de máxima verosimilitud. A la primera puede denominarse métodos “similares a Newton”. En este caso, en cada iteración, se calcula una estimación del hessiano (matriz cuadrada de $n \times n$, de las segundas derivadas parciales),

Modelos de elección discreta aplicados a datos simulados como aproximación un modelo de transporte para la ciudad de La Paz

ya sea utilizando las segundas derivadas de la función (método de Newton-Raphson) o utilizando el producto externo del gradiente. Este enfoque es muy poderoso si la función se comporta bien, pero puede funcionar mal de otra manera y fallar después de algunas iteraciones. El segundo, actualiza en cada iteración la estimación del hessiano. A menudo es más robusto y puede tener un buen desempeño en los casos en que el primer caso no funciona.

4. RESULTADOS

Características generales del modo de transporte en La Paz

Las características generales del transporte en el municipio de La Paz para los datos simulados se determinaron principalmente con la información de la Encuesta Municipal de movilidad intraurbana. En La Paz se concentra una gran actividad económica y social, y por ello abarca no sólo al municipio en sí mismo, sino además al municipio aledaño de El Alto, por tanto el estudio del modelo de transporte también involucra este hecho.

Para los fines de este estudio, se tomó en cuenta la información proveniente del GAMLP, en la cual para la ciudad de La Paz se cuenta con 540 rutas del servicio público de transporte colectivo de pasajeros, según el siguiente detalle:

Tabla N° 1
Rutas de servicio público por tipo de transporte. 2016

Tipo de Vehículo	Total
Bus	26
Carry	90
Micro	51
Minibus	280
Trufi	93
Total	540

Fuente: GAMLP

Del total de 540 rutas, se advierte la preponderancia que tienen los minibuses y carries, que representan alrededor del 68,5% del total de rutas para el municipio de La Paz. La información simulada intenta reflejar esta estructura pero adiciona otras formas de transporte como ir a pie o elegir el teleférico.

Para fines prácticos en la elaboración del modelo de transporte, se reagruparon algunas categorías del modo de transporte de nuestra ciudad, y se trabajó con sólo 6 categorías, que son: a) A pie, b) vehículo propio, c) trufi y taxi, d) minibús y carry, e) micro junto con bus y microbús, y finalmente el f)Pumakatari agrupando además en esta categoría a la nueva modalidad de transporte por teleférico. Es bueno aclarar que no se consideró el medio de transporte del radiotaxi por tener una mínima frecuencia en los resultados de la encuesta de movilidad intraurbana del municipio de La Paz, y porque su costo de pasaje tan variable representaba un sesgo a la información simulada.

Tabla N° 2
Porcentaje de viajes por modo de transporte en la ciudad de La Paz

Modo de Transporte	Porcentaje (%)
a) A pie	13,03%
b) Vehículo Propio	4,64%
c) Trufi y taxi	8,75%
d) Minibus, Carry	63,4%
e) Micro, Bus, Microbus	8,04%
f) Pumakatari, Teleférico	2,14%
Total	100,0%

Fuente: Elaboración propia en base a los datos simulados desde la encuesta de Movilidad Intraurbana del GAMLP

La cantidad de viajes por modo de transporte que se generó para el área metropolitana de La Paz y El Alto, se resume en la Tabla N° 2. El mayor porcentaje lo representa el minibús con el 63,4%. También se puede observar que el 73,58% de los viajes se realizan en minibús, micro o Pumakatari, el 13,03% a

pie, el 4,64% en vehículo propio y solamente el 8,75% en trufi o taxi.

Otros datos relevantes de la encuesta de Movilidad Intraurbana señalan que se tienen cerca de 900 mil personas que utiliza el sistema de transporte desde y hacia la ciudad de La Paz. En general, el tiempo promedio que la población destina en cada tramo, es alrededor de 30 minutos. La información simulada intenta utilizar los valores estimados presentados por la encuesta.

El Modelo Multinomial Logit

La encuesta de Movilidad Intraurbana realizada por el GAMLP arroja un gran conjunto de variables, de las cuales se hizo una selección. De acuerdo a los trabajos realizados en varios países sobre un modelo de transporte, se han establecido como prioritarias las variables costo del tramo (Tr1Cos), tiempo de espera del tramo (Tr1Esp) en minutos, la duración del tramo (Tr1Dur) en minutos. Se consideraron adicionalmente algunas variables sociodemográficas, como el nivel socioeconómico, y resultó en algún modelo relevante considerando la categoría nivel socioeconómico bajo, esto significa que este factor influye a la hora de elegir un medio de transporte como se esperaba. No obstante lo anterior, resulta mejor explicada por el costo del tramo que es la variable elegida para el modelo final.

Se tiene la elección del modo de transporte tomando en cuenta la duración del viaje, el costo del modo de transporte elegido y el tiempo de espera para tomar el medio de transporte. Las salidas utilizando el paquete mlogit del R son:

Coeficientes de la estimación:

Estimación Error estándar valor z Pr(>|z|)

Tr1Dur -0,0998722 0,0094165 -10,6061 < 2,2e-16 ***

Tr1Cos -0,1111034 0,0156372 -7,1051 1,203e-12 ***

Tr1Esp 0,0657895 0,0053321 12,3383 < 2,2e-16 ***

Significancia: 0 **** 0,001 *** 0,01 ** 0,05

Log-verosimilitud: -761,7

Todos los coeficientes son altamente significativos y tienen el signo que se esperaba. También las desviaciones estándar de los parámetros estimados son pequeñas, que significa que están bien identificadas.

Interpretando el modelo, en el caso del costo del viaje (Tr1Cos) y del tiempo que dura el viaje (Tr1Dur), ambas con signo negativo, sucede que un aumento en la probabilidad de la elección del medio de transporte disminuye con un costo más alto o con un tiempo de duración del viaje más largo. No pasa lo mismo con el tiempo de espera del modo de transporte.

A diferencia de los signos, los coeficientes no se pueden interpretar directamente, pero al dividirlos por el coeficiente de precios, obtenemos valores monetarios. Por ejemplo dividiendo el coeficiente del tiempo de duración del viaje (en minutos) sobre el coeficiente del costo del viaje (en Bs.) nos da un incremento de 0,8989 Bs. que la persona estaría dispuesta a pagar por disminuir la duración del viaje.

Las probabilidades de cada una de las alternativas del modo de transporte elegidas son:

Tabla N° 3
Probabilidades de cada una de las alternativas

Modo de Transporte	Porcentaje (%)
a) A pie	0,29614664
b) Vehículo Propio	0,18880248
c) Trufi y taxi	0,10588330
d) Minibus, Carry	0,02315372
e) Micro, Bus, Microbus	0,10588330
f) Pumakatari, Teleférico	0,12052948

Fuente: Elaboración propia en base a los datos simulados desde la encuesta de Movilidad Intraurbana del GAMLP

Modelos de elección discreta aplicados a datos simulados como aproximación un modelo de transporte para la ciudad de La Paz

Es decir de acuerdo al modelo presentado el medio de transporte con mayor probabilidad de ser elegido tomando en cuenta el costo, tiempo de espera y duracion del viaje es la opción a pie, le sigue el disponer de un vehículo propio, y después el Pumakatari y Teleférico. Son las tres primeras opciones que prefieren las personas, y en el otro extremo con la menor probabilidad de ser elegido está el minibús y carry, seguido del micro, bus, microbus. Por tanto, en la ciudad de La Paz las personas prefieren, si tuvieran la opción de elegir de acuerdo a las características del costo del transporte, del tiempo de espera para este medio y de la duración del viaje, el ir a pie, y en el lado opuesto la opción menos placentera es el minibús.

El Modelo Multinomial Probit

Para aplicar el modelo multinomial Probit, solamente se debe modificar del comando en R el argumento `probit=TRUE`. Para este modelo se restringió las categorías del modo de transporte a minibús, micro, vehículo propio y trufi por la importancia que cada uno de estos medios de transporte representa en la ciudad de La Paz y a fin de facilitar el procesamiento engorroso que significa trabajar con el modelo multinomial probit.

Las salidas para el modelo propuesto son:

Coeficientes de la estimación:

	Estimación	Error estándar	Valor z	Pr(> z)
Trufi(intercepto)	-0,515234	0,203634	-2,5302	0,011400 *
Micro(intercepto)	-1,386419	0,333234	-4,1605	3,176e-05 ***
Propio(intercepto)	-2,536006	0,874300	-2,9006	0,003724 **
Tr1Dur	-0,081552	0,020845	-3,9124	9,140e-05 ***
Tr1Cos	-0,099579	0,012336	-8,0721	6,661e-16 ***
Tr1Esp	0,077496	0,016744	4,6283	3,686e-06 ***
Taxi.Micro	-0,404094	0,644924	-0,6266	0,530937
Taxi.Propio	-0,139860	1,615239	-0,0866	0,930999

Micro.Micro 0,831226 0,487264 1,7059 0,088026 .

Micro.Propio -0,168226 1,686771 -0,0997 0,920557

Propio.Propio 1,755431 0,746906 2,3503 0,018760 *

Significancia: 0 **** 0,001 *** 0,01 ** 0,05 * .? 0,1 ' ' 1

Log-Verosimilitud: -284,39

En este caso el modelo probit propuesto tiene además de la duración del viaje, costo y tiempo de espera como coeficientes significativos del modelo, a los medios de transporte trufi, micro y vehículo propio también significativos, dejando de lado el minibús. Los errores estándar de los coeficientes también son bastante pequeños en algunos casos, y sólo en el costo del tramo menor que el del modelo multinomial logit.

5. CONCLUSIONES

En general, los resultados han sido alentadores, mostrando que la simulación de las características de la forma de transporte en la ciudad de La Paz basándose en encuestas por muestreo anteriores, arroja resultados congruentes a pesar de elegir unas pocas características del gran número de variables relevadas en la encuesta. Sin embargo, una debilidad de la simulación es la imposibilidad de modelar de mejor forma la distribución y asignación de viajes por la falta de especificidad geográfica en las características simuladas.

En cuanto a los modelos estadísticos de elección discreta, mediante la comparación de modelos multinomial logit y probit, se puede decir que los costos, el tiempo de espera del tramo y el tiempo de duración del tramo, son determinantes en la elección del modo de transporte para los habitantes de la ciudad de La Paz, a diferencia de las variables sociodemográficas.

En la ciudad de La Paz se tiene al menos seis categorías de transporte estudiadas,

de las cuales cuatro corresponden al transporte público. Las rutas de estas últimas modalidades se han ido desarrollando sin considerar estrictamente la existencia de las demás o sin una planificación adecuada. Esto lleva a que las mismas se aglomeren en diversos puntos de la ciudad, principalmente el centro y que se perjudiquen mutuamente debido a la aglomeración vehicular que provocan. Al no existir medios alternativos en la ciudad de La Paz, además de su topografía accidentada, hace que los ciudadanos sean cautivos del actual sistema de transporte, que carece de la aptitud de mejorar su capacidad técnica y financiera para ofrecer un mejor servicio a la ciudadanía, lo que repercute en los resultados de las variables estudiadas.

En el modelo multinomial logit presentado se enfatiza el medio de transporte con mayor probabilidad de ser elegido tomando en cuenta el costo, tiempo de espera y duración del viaje, como la opción a pie, le sigue el disponer de un vehículo propio, y después el Pumakatari y Teleférico. Estos últimos destacan por el hecho de presentarse como alternativas recientes de mejoramiento del transporte, pero que no logran abarcar aún

un porcentaje suficiente en su uso por los habitantes de la ciudad de La Paz.

En tanto que en términos de probabilidad de elección se ubican en el lado opuesto y con la menor probabilidad de ser elegidos al minibús y carry, seguido del micro, bus, microbús entre las opciones menos placenteras.

Finalmente, los resultados encontrados permiten señalar algunas recomendaciones en relación a las políticas sobre transporte para la ciudad de La Paz. Inicialmente tomando en cuenta los datos simulados, se encuentra que los modos de transporte más económicos son los elegidos por la población, como el ir a pie, y también aquellos que a pesar del tiempo de espera para su abordaje, proporcionan una forma más eficiente, segura y rápida de transporte como son las nuevas modalidades de Pumakatari y Teleférico. Por consiguiente, resultará conveniente incentivar esta forma de traslado más seguro para que una mayor parte de la población la elija, además de diseñar rutas que logren evadir eludir de cierta forma la centralización de la ciudad circulando por áreas que evadan la alta aglomeración vehicular.

BIBLIOGRAFÍA

Anda, C., Erath, A. y Fourie, P., (2017), "Transport modeling in the age of big data". International Journal of Urban Sciences.

De Dios Ortuzar, J. y L.G. Willumsen, (2011), "Modelos de Transporte". John Wiley & Sons.

Fajardo, H.C.L., & Gomez, S.A.M., (2015), "Análisis de la elección modal de transporte público y privado en la ciudad de Popayán. Territorios", 33, pp.157-190.

Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, (2015), "Movilidad intraurbana en la Región Metropolitana de La Paz". Secretaría Municipal de Planificación para el desarrollo. pp 39-68.

MacFadden, D., (1974), "The Measurement of Urban Travel Demand". Journal of Public Economics.

Train, K., (2003), "Discrete choice analysis methods with simulation". Cambridge: Cambridge University Press.