



4-2-2012



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA
DE MÉXICO

MODELO DE DEMANDA DE
TRANSPORTE URBANO, CASO
PRÁCTICO: LÍNEA 4 DEL METRO-BUS



Tesis de Licenciatura | González Vargas Carlos
Arturo, Jazmín Rodríguez Luis Ángel &
Pacheco Barreiro Alejandro

Contenido

Introducción	4
Capítulo 1 Problemática y Antecedentes	7
1.1. Problemática del transporte	7
1.1.1. Características de la oferta y demanda del transporte	7
1.1.2. Equilibrio entre Oferta y Demanda	9
1.1.3. Círculo vicioso de coche y transporte público	11
1.2. Antecedentes del sistema	12
1.2.1. Encuesta Origen Destino (EOD) 2007	13
1.2.1.1. Metodología y resultados de la EOD 2007.....	13
1.2.1.2. Objetivos de la EOD 2007.....	14
1.2.1.3. Diseño de la encuesta	14
1.3. Los modelos y su papel	24
1.3.1. Teoría de la decisión normativa o racionalidad subjetiva	25
1.3.2. Elección de enfoques de modelado	25
Capítulo 2 Metodología	27
2.1 Procedimiento de modelado	27
2.2 Procedimiento de modelado	27
2.3 Simulación de sistemas	31
2.3.1 Definición y metodología de la simulación de sistemas.	31
2.3.2 Modelo de caja negra desde el punto de vista de la simulación	33
2.4 Modelado de los sistema de transporte	34
2.4.1 Toma de decisiones y modelización.....	34
2.4.2 Decisión basada en los planes básicos	35
2.4.3 La Utilidad	37
2.4.4 Calibración del modelo.....	40
2.4.5 Metodología para la calibración de parámetros β , τ , α_j del modelo.	43
2.4.6 Tiempo y costo restante	45
Capítulo 3 Modelo	48
3.1. Calibración del modelo	48
3.1.1. Obtención de los datos.....	48
3.1.2. Primera calibración (β , τ , α_j).....	52
3.1.3. Segunda calibración (A_{im} y γ_i).....	58
3.2. Pruebas de independencia de datos y bondad de ajuste	61
3.2.1. Pruebas de independencia de los datos c_{ij} , t_{ij}	62

3.2.2.	Pruebas de bondad de ajuste de los datos <i>cijy tij</i>	73
3.3.	Planteamiento del escenario y simulación	81
3.3.1.	Escenario a simular: “Línea 4 del metrobús en la Ciudad de México”	81
3.3.2.	Simulación y corrida del modelo.....	83
Capítulo 4 Resultados, conclusiones y recomendaciones		86
4.1.	Escenario base. Demanda Observada vs Demanda Simulada .	86
4.1.1.	Total de todos los modos.....	87
4.1.2.	Modo Infraestructura.....	88
4.1.3.	Modo Individual.....	90
4.1.4.	Resto de los modos	92
4.2.	Escenario Base vs. Escenario Alternativo	94
4.2.1.	Total de los modos	94
4.2.3.	Modo individual	99
4.3.	Resumen	102
4.4.	Recomendaciones	104
Bibliografía:		105
Referencias:		105

RESUMEN

El Transporte es un medio de traslado de personas o bienes desde un lugar hasta otro. El transporte comercial moderno está al servicio del interés público e incluye todos los medios e infraestructuras implicadas en el movimiento de las personas o bienes, así como los servicios de recepción, entrega y manipulación de tales bienes. El transporte comercial de personas se clasifica como servicio de pasajeros y el de bienes como servicio de mercancías.

En la actualidad la planificación del transporte urbano en las grandes ciudades se tiene que enfocar a resolver problemas comunes como son la congestión, contaminación, alta demanda de transporte público, grandes diferencias en el ingreso de la población, limitación de recursos, etc.

Para lograr buenos resultados, esta planificación puede basarse en análisis realizados al comportamiento del sistema con sus necesidades y respectivas soluciones posibles.

Dentro de las herramientas que se usan al planificar, se incluye el modelado del sistema de transporte de la ciudad estudiada, utilizando la información disponible para realizar un análisis con fidelidad estadística de su comportamiento actual y el comportamiento teórico en diversas situaciones. Sin embargo, la modelización es sólo uno de los elementos en la planificación de transporte: las prácticas administrativas, un marco institucional, buena comunicación política, los medios de comunicación y el público son algunos de los otros requisitos para un eficaz sistema de planificación.

En este estudio se realiza el análisis mencionado tomando en cuenta la información estadística obtenida por el INEGI mediante la Encuesta Origen-Destino 2007 para modelar el sistema de transporte de la Ciudad de México, aplicando el modelo propuesto por Norbert Oppenheim al estudio de un caso práctico.

Introducción

El transporte en México ha tenido diversas modalidades a lo largo del tiempo, en la época prehispánica los mexicas utilizaban canales para trasladar sus mercancías, en el valle de México existían varios lagos como el de Texcoco, Chalco, Xochimilco, Xaltocan, Zumpango y Tenochtitlán, que facilitaban este tipo de transporte.

La llegada de los europeos a lo largo de casi toda América produjo grandes cambios en los medios de transporte. El principal modo de comunicación era el marítimo, dado que era más eficiente y rápido para puertos naturales y para los lugares en los que se construyeron puertos, tanto de mar como de los caudalosos ríos americanos.

Para el año de 1861 se da la primera solicitud en la ciudad de México para instalar un ferrocarril hacia el Estado de México, dicho permiso se concedió a los Abreu, así el 8 de octubre de 1865 se inaugura el primer tramo México- Tacubaya.

El primer sistema de tranvías fue instalado en Toluca alrededor de 1884. Los primeros tranvías eran movidos por equinos, luego se les adaptaron viejos motores de automóvil y posteriormente se hicieron eléctricos.

Dado el incremento demográfico y la creciente demanda de medios de transporte, en 1905 se presentó un proyecto de tren subterráneo pero no prosperó. Unos años después, en 1908, surgió un servicio llamado "rápidos", que iban del zócalo con dirección a Tlalpan, Coyoacán, San Angel, Mixcoac y Tacubaya. Su circulación tenía preferencia y cuando pasaban, todo el tránsito se detenía.

El primer automóvil de combustible que llegó a México fue un Belleville hecho a mano, procedente de Tolón, Francia, fue introducido a fines de siglo XIX. Con la invención de los motores de combustión interna, la producción en serie de automotores empezó a generar cambios en el modo de transporte. En el siglo XX la formación e instalación de grandes corporaciones de fabricantes ha dado un gran impulso a la producción de vehículos tanto para el uso particular como para el transporte público y de mercancías, así como la exportación a terceros países.

Hoy en día el transporte público en la ZMVM comprende una red de metro, microbuses y combis. Para efectos prácticos, en esta tesis se toma en cuenta al metro y metro-bus como un medio de transporte de infraestructura, a los automóviles y taxis como transporte individual.

Hoy en día existen diferentes medios de transporte en la ciudad. El Sistema de Transporte Colectivo – Metro de la Ciudad de México es la columna vertebral del transporte en la capital mexicana. Cuenta con 11 líneas y 175 estaciones. Debido a la demanda ciudadana, el gobierno capitalino impulsó el proyecto de construcción de la

línea 12, que contará con un total de 24 km, conectará al sur-oriente desde la delegación Tláhuac con el poniente en la delegación Álvaro Obregón, donde además pasara por delegaciones como Coyoacán, Benito Juárez e Iztapalapa.

Al metro se articulan en diferentes estaciones el servicio de la Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal (RTP), que presta sus servicios de transporte en autobús con 88 rutas, a un promedio de 260 mil pasajeros cada día en las zonas más pobres del Distrito Federal. Además de estas dos empresas, el GDF administra el Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE-DF), que se encarga de la operación de las 11 líneas de trolebuses, y el tren ligero.

Por ser empresas dependientes del gobierno capitalino, el Metro, la RTP y el STE-DF reciben fuertes subsidios que han mantenido una tarifa en MXN 2 —equivalente a menos de USD 0,20 a principio del año 2007— en todos sus servicios, excepto en el Metrobús, cuya tarifa es de MXN 5.

Por otra parte, el GDF creó el organismo público descentralizado Metrobús, el cual es el responsable de la planeación, administración y control del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal y cuenta actualmente con 3 corredores, la primera línea de Indios Verdes en el Norte de la ciudad a El Caminero al sur de la ciudad, recorriendo la avenida Insurgentes, la línea 2 que va de la estación Tepalcates en el Oriente de la ciudad a Tacubaya en el Poniente de la ciudad recorriendo el eje vial 4 sur y la línea 3 que va de Tenayuca al norte en el límite del Distrito Federal con el municipio de Tenayuca a la glorieta de Etiopía al sur, atravesando la ciudad por el eje 1 poniente y la avenida balderas.

Además de las tres empresas de transporte descentralizadas del GDF, existe en el Distrito Federal una nutrida flota de autobuses urbanos, conocidos como *peseros* o *microbuses*. Estos están organizados en casi un centenar de *rutas* concesionadas, que son supervisadas por la Secretaría de Transporte y Vialidad del Distrito Federal (Setravi-DF). En 2002, la Setravi-DF tenía un padrón de 27 mil 928 vehículos registrados con placas para el transporte colectivo de pasajeros; además de 105 mil taxis.

A partir del primero de marzo del 2010 entró en operación el corredor vial Periférico, con una longitud de 36 kilómetros, del Toreo a Cuemanco, donde circulan alrededor de 250 autobuses largos con tecnología Euro IV, que sustituyen a 550 microbuses, lo anterior se realizó bajo contrato del gobierno del Distrito Federal y la sociedad mercantil Corredor Periférico SA (Copesa), por parte de los concesionarios de las rutas 2 y 98. Con estos nuevos camiones, llamados eléctricos se pretende disminuir la contaminación y brindar un mejor servicio a los 270 mil usuarios del periférico a través de la instalación de 72 paradas para la prestación del servicio ordinario y exprés. El costo del servicio es de \$4.50.

En agosto de 2006 se inició la construcción del primer sistema ferroviario suburbano de pasajeros, llamado Tren Suburbano, que reduce las tres horas que una persona gasta en transportarse desde Cuautitlán a la estación Buenavista a solo 25 minutos. Su inauguración en fase de pruebas se realizó en marzo del 2008 y a partir del 2 de junio del mismo año ha comenzado sus operaciones oficialmente. A futuro se planea extender la línea existente a otras zonas además de crear líneas adicionales.

Objetivo General

El objetivo de esta tesis es generar un modelo que estime la demanda de transporte de personas a partir de los costos y tiempos de traslado, con la finalidad de evaluar políticas orientadas a la solución de los problemas de congestión y saturación de medios/vías de transporte, presentes en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). La zona específica de estudio es la línea 4 del metrobús.

Capítulo 1 Problemática y Antecedentes

Objetivos del capítulo

1. Abordar la problemática en la planeación del transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México, considerando los principios básicos del equilibrio que debe existir entre la oferta y la demanda, empleadas en un modelo de transporte.
2. Tratar los antecedentes para el planteamiento del modelo, mismos que provienen de fuentes de información confiables como el INEGI.
3. Abordar la importancia de los modelos en la planeación del transporte y sus diversos enfoques.

1.1. Problemática del transporte

1.1.1. Características de la oferta y demanda del transporte

La demanda de servicios de transporte es altamente cualitativa y diferenciada. Hay toda una serie de demandas específicas para el transporte que se diferencian por hora del día, el día de semana, el propósito de viaje, el tipo de carga, la importancia de gasto, la frecuencia etc. La demanda se da cuando la gente viaja a fin de satisfacer una necesidad (trabajo, ocio, salud) a su destino.

La oferta y demanda de transporte tienen elementos dinámicos muy fuertes. Mucha de la demanda de transporte se concentra en unas pocas horas después de un día, en particular en las zonas urbanas donde la mayoría de la congestión tiene lugar durante los períodos de mayor actividad específica. Esta demanda es variable en el tiempo de transporte y hace más difícil analizarla y prevenirla. Se podría diseñar bien un sistema de transporte con el promedio de la demanda de viajes en un área determinada, pero esa cantidad se descompone durante los períodos de mayor actividad.

Existen técnicas para tratar de propagar el pico y promedio de la carga del sistema: horarios de trabajo flexibles, escalonar los horarios de trabajo, la prima de precios y así sucesivamente. Desafortunadamente, menor actividad y variaciones en la demanda

siguen siendo un problema central en la elaboración de modelos y planificación de transporte.

Por su parte, la oferta se caracteriza por ser un servicio y no un bien. Un servicio de transporte debe ser consumido y cuando se produce, de lo contrario se pierde su beneficio. Por esta razón es muy importante estimar la demanda con tanta precisión como sea posible en orden a él.

Muchas de las características de los sistemas de transporte se derivan de su naturaleza como un servicio. En términos muy generales, un sistema de transporte requiere un número de activos fijos, la infraestructura y número de unidades móviles, los vehículos. Es la combinación de estos, junto con un conjunto de reglas para su funcionamiento, lo que hace posible la circulación de personas y mercancías.

Las inversiones en infraestructura de transporte no sólo son inestables, sino también toman mucho tiempo en llevarse a cabo. Así la construcción de una línea de metro puede tardar de 5 a 15 años desde la planificación hasta plena aplicación. Esta interrupción implica costos adicionales a los usuarios y no usuarios por igual.

En un mercado perfecto, una buena asignación de recursos para satisfacer las necesidades humanas, sólo se logra cuando los costos marginales¹ de las mercancías son iguales a su utilidad marginal², este marco general proporcionará la base para el contraste de otras formas de organizar el precio de sistemas y su impacto sobre la asignación de recursos. Por supuesto la moneda real de los mercados no perfectos y capacidad de pago no es una buena indicación de necesidad.

Esto afecta en gran medida, puesto que el transporte es un elemento muy importante en el bienestar de las naciones y el bienestar de los habitantes urbanos y rurales.

Un elemento adicional de distorsión es proporcionado por el número de efectos secundarios asociados con la producción de servicios de transporte: los accidentes, la contaminación y la degradación del medio ambiente en general. Estos efectos son rara vez contemplados.

Una de las características más importantes de la oferta de transporte es la congestión. La congestión surge cuando los niveles de demanda se enfocan a la capacidad de una instalación y el tiempo necesario de traslado incrementa muy por encima del promedio en condiciones de baja demanda. En el caso de la infraestructura de transporte, la inclusión de un vehículo adicional genera demora suplementaria a todos los demás usuarios como se observa en la Figura 1:

¹ Es el costo de producir un servicio adicional de transporte.

² Es un agente económico o un bien por cada servicio adicional de transporte que se consuma.

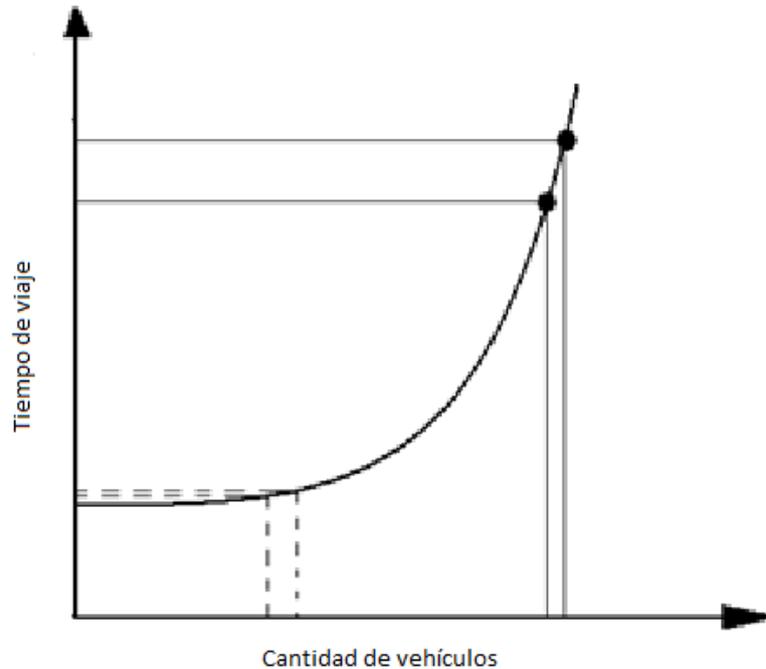


Figura 1 Aumento de vehículos.

Se puede observar que el tiempo de viaje aumenta exponencialmente con respecto al aumento en la cantidad de vehículos que transitan una vía.

1.1.2. Equilibrio entre Oferta y Demanda

En general, la función de la planificación de transporte no garantiza la satisfacción de una cierta demanda para los movimientos de mercancías y de la persona con fines de viaje distintos, en momentos diferentes de los días y el año, utilizando distintos modos, lo que nos da cuenta de un sistema de transporte con una cierta capacidad de funcionamiento. El propio sistema de transporte puede verse conformado por:

- Una infraestructura.
- Un sistema de gestión.
- Un conjunto de modos de transporte y sus operaciones.

Para hacer más cuantificables estos movimientos que alteran la demanda, es necesario definir funciones matemáticas que nos brinden un concepto general del sistema o red de transporte en una zona urbana.

Para generar un indicador general del nivel de servicio proporcionado por el sistema de transporte, la velocidad de la red puede tomarse como una aproximación inicial. En términos muy generales, dicha velocidad puede estar representada por:

$$S = f\{Q, V, M\} \dots (1.1)$$

Donde:

- S= conjunto de las velocidades
- V= conjunto de volúmenes en una red
- Q = capacidad de explotación
- M= sistema de gestión

Así mismo se infiere que: La capacidad **Q** dependería del sistema de administración o gestión “**M**” y de los niveles de inversión:

$$Q = f\{I, M\} \dots (1.2)$$

Donde:

I = inversión en los años

Con el fin de mejorar el nivel de servicio, en un sistema de gestión se puede redistribuir o jerarquizar la capacidad de la red de transporte tomando en cuenta los siguientes factores.

- Infraestructura de la región: metro, suburbano, autobuses, tranvía, etc.
- Capacidad de la producción del servicio en la región. Que no es más que la derivada de **Q** con respecto al tiempo [**Q**’].
- Dar prioridad a ciertos tipos de usuarios sobre otros, ya sea en eficiencia, medio ambiente o razones de equidad.

Como en el caso de la mayoría de los bienes y servicios, sería de esperar que el nivel de la demanda dependa del nivel de servicio proporcionado por el sistema de transporte y también sobre la asignación de las actividades **A** sobre el espacio o región:

$$D = f\{S, A\} \dots (1.3)$$

Donde:

- D** = nivel de demanda
- S** = velocidad o nivel de servicio
- A** = asignación de actividades

En la combinación de ecuaciones (1.1) y (1.3) para un sistema de actividad fijo, se encontraría el conjunto de puntos de equilibrio entre oferta y la demanda de transporte.

Pero a continuación, nuevamente, el propio sistema de actividad probablemente cambiaría a medida que cambian los niveles de servicio en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto, se deben tomar en cuenta puntos de equilibrio a corto y a largo plazo.

Las relaciones de causa-efecto pueden representarse gráficamente para ayudar a entender la naturaleza de algunos problemas de transporte. Un ejemplo típico es el círculo vicioso de transporte del coche.

1.1.3. Círculo vicioso de coche y transporte público

El crecimiento económico proporciona el primer impulso para aumentar la propiedad. Los propietarios de automóviles incrementan día a día, esto significa más personas esperando para transferirse de transporte público a coche; por lo que tenemos menos transporte público y pasajeros, con lo que los operadores pueden responder al aumentar las tarifas, reducir la frecuencia o ambos. Estas medidas hacen incluso más atractivo el uso del automóvil e inducen a más personas para comprar coche, acelerando así el círculo vicioso.

Esta representación simple también puede ayudar a identificar lo que puede hacerse para frenar o reservar este círculo vicioso. Estas ideas se resumen en las medidas físicas de la figura siguiente como rutas de autobús o de otros regímenes de arrendamiento de los autobuses son particularmente atractivos, tal como también resultan en una asignación más eficiente del espacio de avenidas.

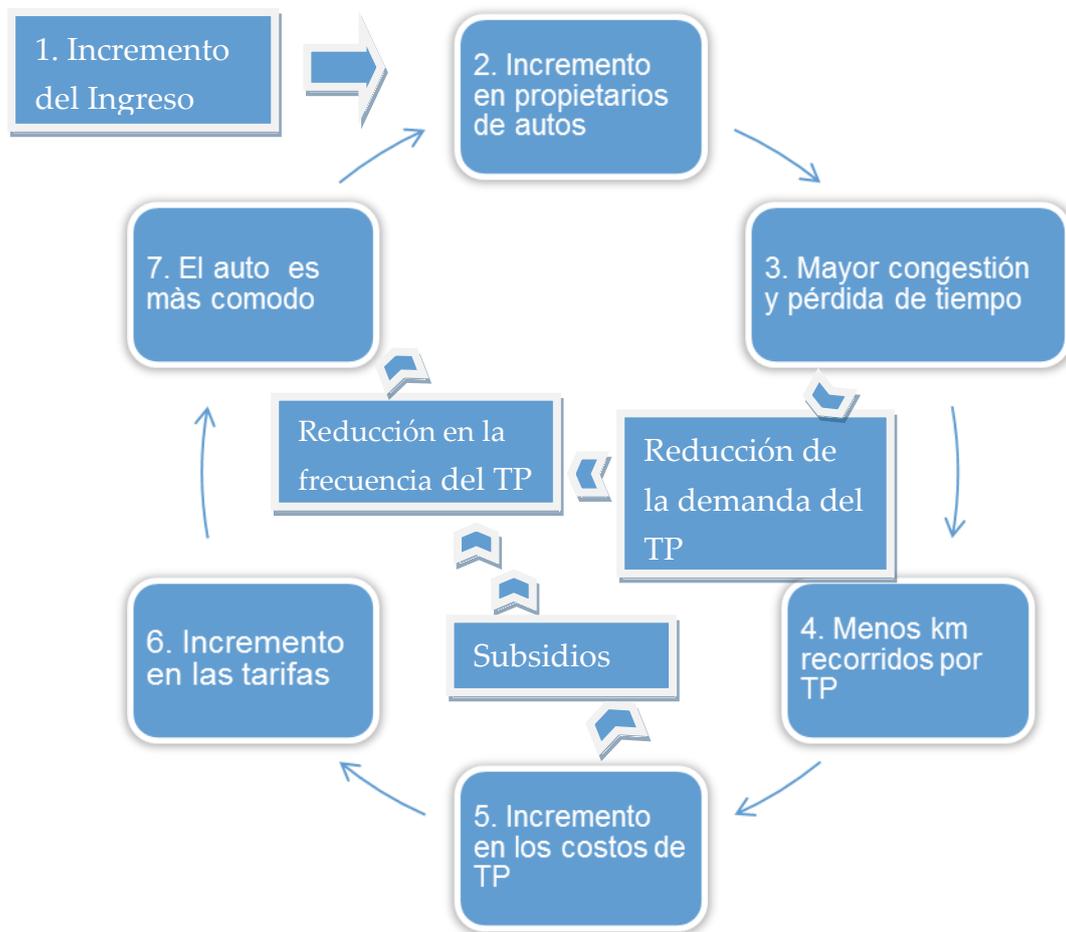


Figura 2 Círculo vicioso coche Transporte Público (TP)

Con mayor ingreso y congestión se incrementa la demanda de automóviles, lo que causa de nuevo mayor congestión e incremento de costos en el TP

1.2. Antecedentes del sistema

La importancia, magnitud y dinamismo de la Zona Metropolitana del Valle de México son factores cruciales que llevaron a las autoridades de gobierno a contar con información confiable, a partir de la cual fuese posible planear eficazmente el transporte.

Las encuestas origen-destino (O-D) son el medio para adquirir dicha información, además son la principal herramienta de los modelos econométricos de transporte más utilizados en la actualidad.

A efecto de conocer la problemática y requerimientos de vialidad de una población determinada, las encuestas O-D de son uno de los instrumentos estadísticos más útiles, por medio de los cuales se indaga en torno a las características de los viajes que la gente realiza cotidianamente en un ámbito espacial determinado.

1.2.1. Encuesta Origen Destino (EOD) 2007

1.2.1.1. Metodología y resultados de la EOD 2007.

El INEGI presentó un oficio integrado por siete apartados. En los dos primeros, se enunciaron los antecedentes de la EOD 2007 y sus objetivos. El tercero corresponde al diseño de la encuesta y mapas temáticos, cuya lectura y análisis permite construir una panorámica de las características más relevantes de los viajes que llevan a cabo los residentes de la ZMVM.

El objetivo general fue el de obtener información que permita determinar la movilidad de los residentes de la ZMVM, beneficiando así el proceso de planeación de transporte y vialidades que llevan a cabo las dependencias correspondientes de los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México.

Para el caso específico de la ZMVM, la experiencia en este tipo de estudios data ya de hace casi un cuarto de siglo. En 1983, la Coordinación General de Transporte del Departamento del Distrito Federal realizó un Estudio Origen-Destino, para el cual se consideró a las 16 delegaciones del DF y a 89 localidades mayores de mil habitantes y las cabeceras de 27 municipios del Estado de México. Once años después, el INEGI levantó la Encuesta de Origen y Destino de los Viajes de los Residentes del Área Metropolitana de la Ciudad de México (EOD 94). En aquella ocasión se captó información de las 16 delegaciones políticas del DF y de 28 municipios conurbados ubicados en el Estado de México.

El 15 de noviembre de 2005, la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión aprobó el Presupuesto de Egresos de la Federación para el ejercicio fiscal 2006, en el cual se destinaron recursos para el Fondo Metropolitano de Proyectos de Impacto Ambiental en el Valle de México.

En el apartado “Obras de infraestructura vial y de comunicaciones” de dicho fondo se contempló, bajo la responsabilidad del GDF, la elaboración del Estudio de Origen y Destino en la Zona Metropolitana del Valle de México, el cual a la postre se concretaría en la Encuesta Origen - Destino de la ZMVM 2007, como uno de sus componentes principales. Conforme al más reciente ejercicio de delimitación realizado por el INEGI en colaboración con la Secretaría de Desarrollo Social y el Consejo Nacional de Población³, el GDF y el GEM

³ SEDESOL, CONAPO e INEGI. Delimitación de las zonas metropolitanas de México. México, 2004.

firmaron en enero de 2005 una Declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de México,⁴ misma que quedó conformada por las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México.⁵ A petición del GDF y del GEM, la EOD 2007 abarcó el estudio de las características de movilidad de las personas residentes tanto en la capital de la República, como en 40 de los 59 municipios del Estado de México que integran la ZMVM.

1.2.1.2. Objetivos de la EOD 2007

Objetivo general: Obtener información que permita determinar la movilidad de los residentes de la ZMVM, beneficiando así el proceso de planeación de transporte y vialidades que llevan a cabo las dependencias correspondientes de los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México.

Objetivos específicos:

- Estimar la cantidad de viajes de la población de 6 años y más que se generan en la ZMVM en días típicos laborables (lunes a viernes, excluyendo periodos vacacionales), así como los motivos por los cuales se realizan.
- Conocer los modos de transporte empleados y los transbordos que se requieren para llegar al destino final del viaje (viajes y tramos de viajes)
- Captar el tiempo y el costo de transportación en un día de viaje.
- Detectar las horas de mayor afluencia de viajes.
- Relacionar las características sociodemográficas de los miembros del hogar con los viajes que realizan.
- Proveer información que permita la calibración de modelos de demanda y oferta de los sistemas de transporte de la ZMVM.⁶

1.2.1.3. Diseño de la encuesta

Experiencias internacionales y prueba piloto

⁴ SECRETARÍA GENERAL DE GOBIERNO DEL GDF. Declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de México, suscrita por el Jefe de Gobierno del Distrito Federal y el Gobernador del Estado de México, el 22 de diciembre de 2005. México, 2005. Gaceta Oficial del Distrito Federal.

⁵ La ZMVM, de acuerdo con la delimitación de SEDESOL, CONAPO e INEGI, se integraba por el DF, 58 municipios del Estado de México y un municipio de Hidalgo. La declaratoria firmada por el GEM y el GDF establece que la ZMVM se integra por el DF y 59 municipios del Estado de México; es decir, en este último instrumento no se considera el municipio hidalguense y en lugar de 58 municipios mexiquenses se incluyen 59. Lo anterior obedece a que en 2003 uno de los 58 municipios del Estado de México considerados en la ZMVM, Jaltenco, cedió parte de su territorio para que fuera creado el municipio de Tonanitla.

⁶ La calibración de modelos de demanda y oferta de los sistemas de transporte es posible al incorporar a los resultados de la encuesta las mediciones que los gobiernos efectúan sobre estudios complementarios como el origen - destino de interceptación a diversos modos de transporte, las encuestas a bordo de vehículos de transporte público y las mediciones de flujo vehicular en puntos de control, calidad de los servicios, aforos, mediciones de calidad de los servicios, etcétera.

Con el objeto de conocer e incorporar nuevas metodologías, se revisaron algunas experiencias de otros países en la realización de estudios de movilidad. Si bien existe toda una gama de formas para realizar el tipo de estudios en cuestión —encuestas en hogares, encuestas a bordo de vehículos de transporte público, de interceptación de diversos medios de transporte, mediciones de flujo vehicular, por mencionar sólo algunos—, en especial se revisó la metodología de las encuestas en hogares, de entre las cuales resultaron particularmente ilustrativos los casos de Chile, España y Canadá.

Asimismo, de octubre de 2006 a marzo de 2007, el INEGI realizó una prueba piloto con el fin de evaluar los instrumentos de captación, manuales, estrategia operativa y productividad del entrevistador de la EOD 2007. La prueba piloto permitió detectar algunos aspectos metodológicos que necesitaban afinarse, como fue el caso del replanteamiento de algunas preguntas del cuestionario, y también permitió evidenciar que era necesario impulsar ambiciosas acciones de difusión de la EOD 2007, a fin de alentar la participación de la ciudadanía.

▲ **Población objetivo**

Residentes de la ZMVM, de 6 años y más de edad, así como visitantes en el hogar que hubieran llegado al menos el día anterior al día en que se dieron los viajes —estos visitantes podían tener o no parentesco con los miembros del hogar, pero también debían cumplir con la condición de la edad—.

▲ **Unidad de selección**

Vivienda particular localizada en la ZMVM, ya sea casa independiente, departamento en edificio, cuarto de vecindad, cuarto de azotea, local no construido para habitación, vivienda móvil, refugio o vivienda de uso temporal.

▲ **Unidades de observación**

Residentes: Personas que viven normalmente en la vivienda, sitio en el cual generalmente duermen, preparan sus alimentos, común y se protegen del ambiente.

▲ **Unidad de análisis**

Viajes efectuados de lunes a viernes, efectuados en la vía pública, a partir de un punto o lugar de origen específico con un destino final, independientemente de la distancia. Los movimientos con diferentes propósitos fueron considerados como viajes separados. El estudio incluye los viajes realizados en algún tipo de transporte, público o privado, sin considerar los viajes a pie.

▲ **Período de levantamiento y momento de referencia**

El período de levantamiento abarcó cinco semanas, de las cuales una se destinó a recuperar rezagos. A cada vivienda se le asignó aleatoriamente un día en el cual se captarían todos los viajes. La información sociodemográfica fue captada el día de la primera entrevista, y se determinó el lunes 28 de mayo de 2007 como referencia.

▲ **Método de levantamiento**

Para recabar la primera parte de la información considerada en el cuestionario, se entrevistó a un informante adecuado por vivienda, a quien se explicó el llenado de los instrumentos de captación. Se entregó en cada hogar un folleto, una carta y, también a manera de recordatorio, una tarjeta imantada, mismos que señalaban el día en el que se captarían los viajes de cada uno de los residentes del hogar, así como las tarjetas de viajes para cada uno de ellos.

▲ **Instrumentos de captación**

El cuestionario se dividió en ocho secciones, mismas que a su vez concentraron información sobre cuatro grandes temas: vivienda, hogares, residentes y viajes.

▲ **Cobertura geográfica**

Para captar el actual patrón de viajes de la población que reside en la ZMVM, la EOD 2007 cubrió las 16 delegaciones del DF y 40 municipios conurbados del Estado de México, la cantidad de distritos por delegación se muestra en la Tabla 1 y por municipios en la Tabla 2. Asimismo en la Figura 3 se muestra la distribución en el mapa de la ZMVM. El área de estudio se dividió en 156 distritos, 84 del DF y 72 mexiquenses, mismos que se conformaron mediante la agrupación de 5,256 Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), como se observa en la figura 4. Así, el trabajo de campo de la encuesta se realizó en un universo que abarcó 154,086 manzanas.

Distrito Federal Clave 09	Números de distritos	Distrito Federal Clave 09	Número de distritos
002 Azcapotzalco	5	011 Tláhuac	3
003 Coyoacán	6	012 Tlalpan	4
004 Cuajimalpa	2	013 Xochimilco	3
005 Gustavo A. Madero	11	014 Benito Juárez	5
006 Iztacalco	4	015 Cuauhtémoc	7
007 Iztapalapa	12	016 Miguel Hidalgo	4
008 La Magdalena Contreras	22	017 Venustiano Carranza	7
009 Milpa Alta	1		
010 Álvaro Obregón	8	Subtotal DF	84

Tabla 1. Código de distritos en DF

En cada delegación hay cierto número de distritos que pueden ser orígenes o destinos de un viaje.

Estado de México Clave 015	Número de distritos	Estado de México Clave 015	Número de distritos
013 Atizapán de Zaragoza	3	060 Nicolás Romero	2
020 Coacalco de Berriozábel	2	099 Texcoco	1
021 Cuautitlan Izcalli	3	104 Tlalnepantla de Baz	6
029 Chicoloapan de Juárez	2	109 Tultitlán	2
031 Chimalhuacán	3	009 Amecameca	1
033 Ecatepec de Morelos	11	025 Chalco	2
037 Huixquilucan	1	075,092 San Martín de las Pirámides	1
039 Ixtapaluca	3	122,103 Valle de Chalco Solidaridad, Tlamanalco	2
070 La Paz	1	024 Cuautitlán	1
057 Naucalpan de Juárez	7	091,095 Teoloyucan - Tepetzotlán	1
058 Nezahualcoyotl	11	023,035 Coyotepec, Huehuetoc	1
002,100 Acolman, Tezoyuca	1	081 Tecámac	2
044,053,059,125,108-120 Jaltenco, Melchor Ocampo, Nextlalpan, Tonanitla, Tultepec-Zumpango	1	011,028,030,069,093 Atenco, Chiutla, Chiconcuac de Juárez, Papalotla, Tepetlaxtoc	1
Subtotal Estado de México		72	

Tabla 2. Código de distritos en la ZMVM

En el Estado de México, los municipios se dividen en distritos que pueden ser orígenes o destinos de un viaje.

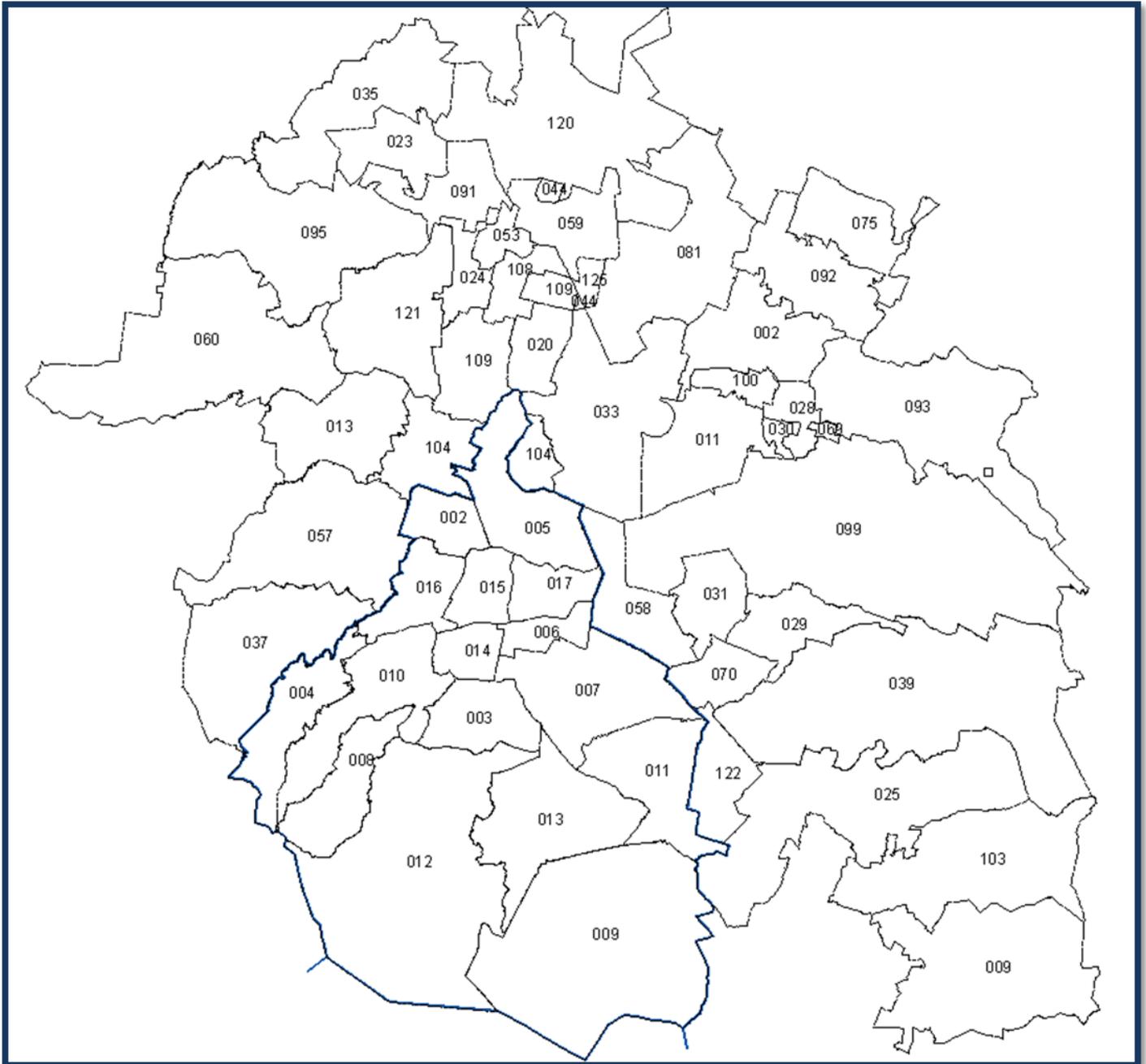


Figura 3. Cobertura geográfica de la EOD 2007
Se muestra en un plano el área que se contempló para realizar la encuesta.

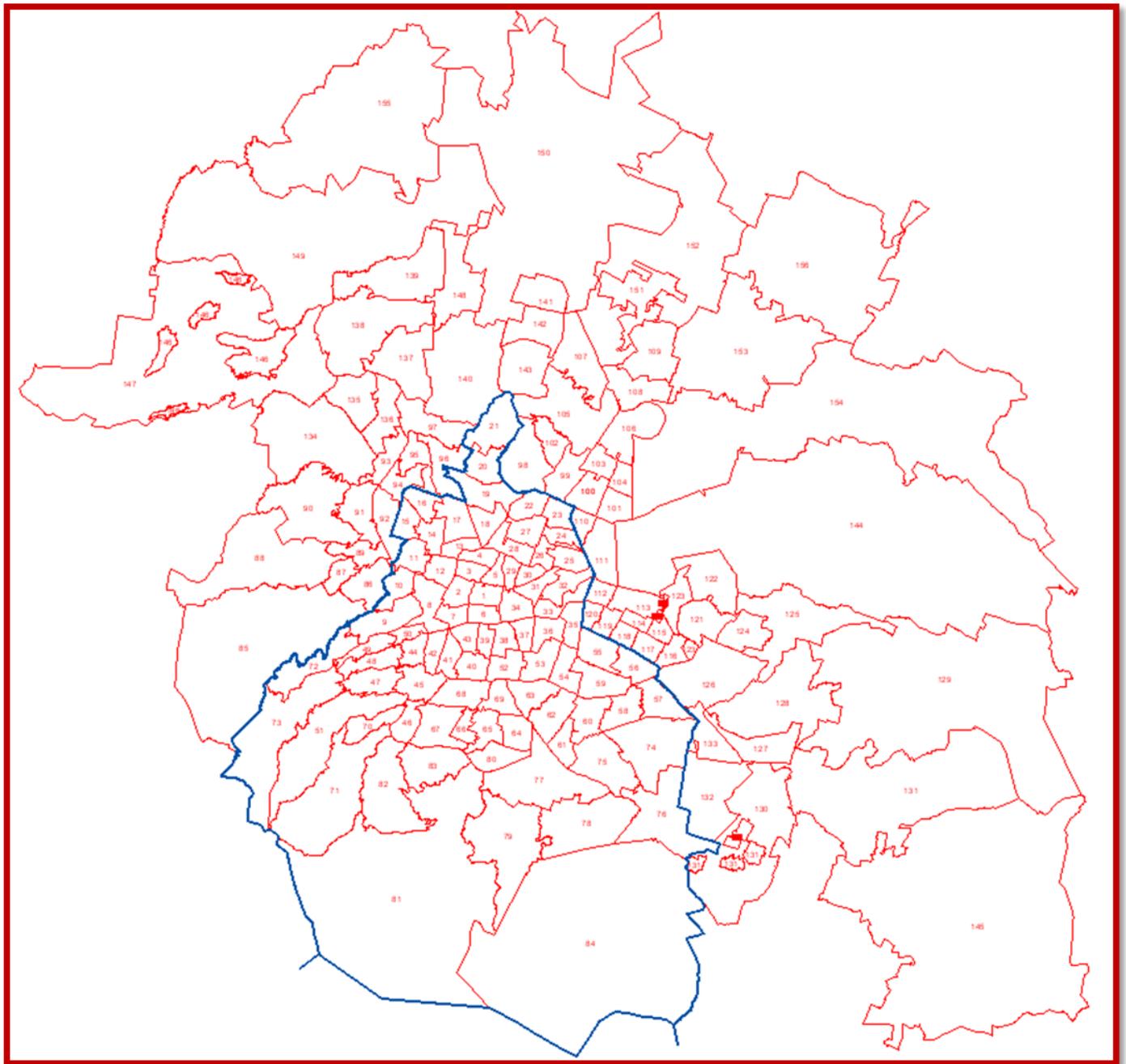


Figura 4. Distritación de la EOD 2007

Se muestran los distritos que abarcó la encuesta. Se brinda un mayor nivel de detalle de análisis en los planos anexos a esta tesis.

▲ **Diseño Estadístico**

El marco de muestreo empleado en la EOD 2007 lo conforman la información cartográfica y los inventarios de vivienda obtenidos en el II Censo de Población y Vivienda 2005. El tamaño de la muestra se calculó con base en el promedio de viajes por vivienda, resultando 360 viviendas a nivel distrito. El total de la muestra, considerando 83 distritos para la Ciudad de México, fue de 29,880 viviendas –se exceptúa el distrito correspondiente al Aeropuerto, que no tiene viviendas–; en el Estado de México, con 72 distritos, se tuvieron 25,920 viviendas. Así, el tamaño de muestra total fue de 55,800 viviendas.⁷

▲ **Levantamiento**

El levantamiento se realizó del 12 de mayo al 16 de junio de 2007. Del total de viviendas consideradas, esto es 55,800, se consiguió realizar entrevistas completas en 49,662, mismas que representan el 89%. El 11% restante lo constituyen viviendas deshabitadas e inadecuadas para ser habitadas, no localizadas o sin entrevista completa.

⁷ Cabe señalar que el tamaño de muestra solicitado fue de 300 viviendas por distrito, lo cual significaba 46,500 viviendas, sin embargo se contempló para el cálculo del tamaño de muestra una selección mayor de viviendas que cubriera las posibles no respuestas que encontrara el operativo –negativas, viviendas deshabitadas, viviendas de uso temporal, no localizadas, etcétera–, por lo que el tamaño de muestra final fue de 55,800.

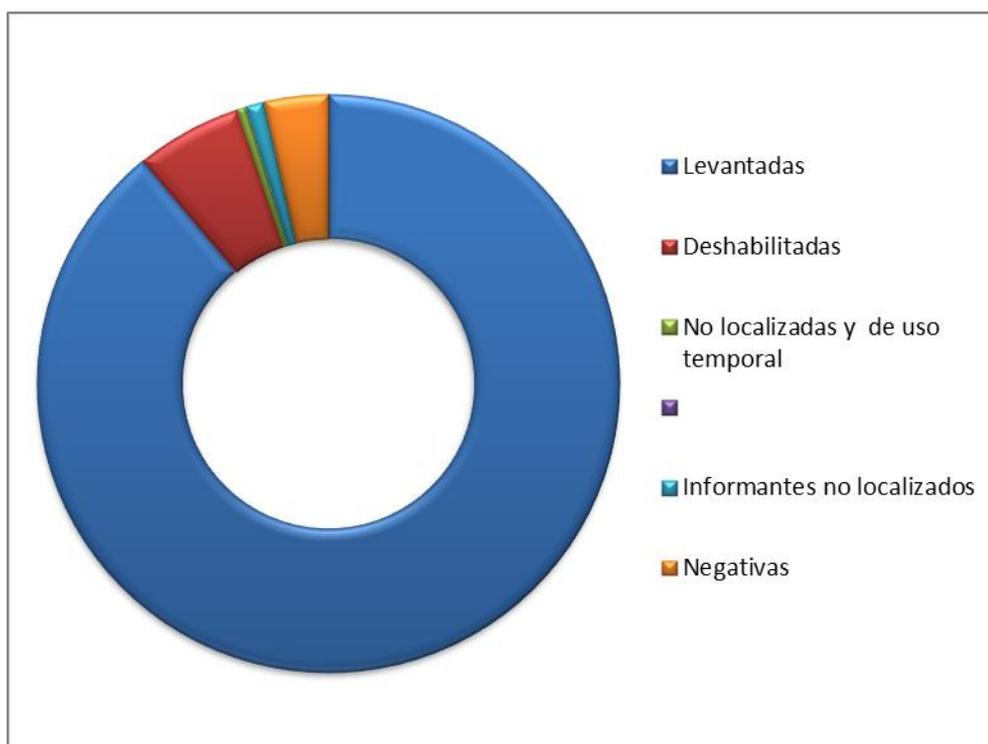


Figura 5. Estadísticas de levantamiento de la EOD 2007

Detalle gráfico del estado logrado en las encuestas realizadas.

▲ **Procesamiento**

En enero comenzó a planearse la administración de datos de la EOD 2007, y en marzo inició la implementación y pruebas de desempeño de los sistemas. El esquema general previó cuatro etapas: captura, validación, explotación y expansión.

▲ **Diseño estructural**

En la Tabla 3 se muestra la manera en que se estructuró la encuesta para su aplicación.

1. Viviendas	* Datos generales de la vivienda	>	
		>	Municipio
		>	Localidad
		>	Número de la manzana
		>	Distrito
		>	Número de vivienda
		>	Total de hogares en la vivienda
		>	Número de habitantes en la vivienda
		>	Etc.

2. Hogares en la vivienda	* Hogares en la vivienda	>	Número de Hogar
		>	Total de cuestionarios en el hogar
	* Vehículos	>	Número de vehículos particulares
		>	Número de vehículos públicos
		>	Si cuenta con motocicleta o bicicleta
		>	Frecuencia de uso, etc.
		>	Tipo de vivienda
	* Renta	>	Pago de vivienda propia
		>	Renta estimada mensual
		>	Cuenta con computadora, TV, etc.
	* Servicios	>	Cuenta con internet, cable, etc.
		>	Periodicidad de ingresos
	* Ingresos	>	Descripción de otro ingreso en el hogar
		>	Rango por salarios mínimos
		>	Ingreso mensual total en el hogar
>		Rango de salario	
>			

Tabla 3. Temática captada por la EOD 2007

3. Residentes del hogar	* Residentes habituales del hogar	>	Actividades habituales del residente
		>	Actividades casuales del residente
		>	Oficio o trabajo del residente
		>	Número de residentes
		>	Personas con discapacidad
		>	Residentes de 6 años y más
	* Características de los residentes	>	Nombre
		>	Parentesco
		>	Sexo
		>	Edad
		>	Estudios
		>	Actividad
		>	Ocupación
4. Viajes	* Información del viaje	>	Número de viaje
		>	Hora de inicio y fin del viaje
		>	Clave de la entidad y municipio de destino
		>	Descripción del lugar de destino
		>	Propósito del viaje

	* Modo de transporte	>	Modo: automóvil particular, metro, etc.
		>	Otro modo: bicicleta, motocicleta, etc.
		>	Estación de abordaje del metro
		>	Estación de descenso del metro
	* Costo del viaje	>	Costo de transporte suburbano
		>	Costo de transporte colectivo
		>	Costo de transporte en Taxi
		>	Costo de otro tipo de transporte
	* Si condujo	>	Cuántas personas viajan en el auto
		>	Lugar y tiempo de estacionamiento
		>	Costo del estacionamiento
		>	Si pago tarifa, en que periodo de tiempo

Tabla 4. Temática captada por la EOD 2007

De la encuesta se obtuvieron resultados con respecto a las modalidades de viaje, que posteriormente pueden ser clasificados de varias formas como se muestra en la Tabla 5.

	Tipo de Transporte	Modo de Transporte	Costo	Lugar de Origen-Destino	Propósito	Tiempo
Viajes	Público	Metro	Pasaje	Hogar	Ir al trabajo Regresar a casa Ir a estudiar	Horas y minutos
		Tren Ligero		Escuela		
		Metrobús		Oficina		
		Trolebús		Centro comercial, tienda, mercado		
	Privado	Autobús RTP	Estacionamiento	Fábrica	Compras	
		Suburbano		Otra vivienda	Llevar o recoger a alguien	
	Mixto	Colectivo	Pasaje	Hospital, clínica consultorio	Social, diversión	
		Taxi		Restaurante, bar cafetería	Relacionado con trabajo	
		Metro		Taller, laboratorio	Ir a comer	
		Tren Ligero		Deportivo, gimnasio	Ir a hacer algún trámite	
Metrobús		Parque, centro recreativo		Otro		
Autobús Foraneo	Pasaje	Otro	Transporte Escolar			
			Trasnporte de personal			
Pumabús						

Tabla 5. Modalidades de viajes

Los viajes se pueden clasificar para su estudio en cuanto a tipo, modo, costo, origen, destino, propósito y tiempo.

1.3. Los modelos y su papel.

Un modelo puede definirse como una representación de una parte real, del sistema de interés, que se concentra en ciertos elementos considerados importantes para su análisis desde un punto de vista particular.

Por lo tanto, los modelos son un problema desde un punto de vista específico. Esa definición amplia permite incorporar modelos físicos y abstractos. El presente documento se preocupa principalmente por una clase de modelos abstractos importante: *modelos matemáticos*.

Esta tesis se refiere a la contribución que puede hacer la modelización de transporte para mejorar la toma de decisiones y la planificación en el ámbito de los transportes. Sin embargo, la modelización es sólo uno de los elementos en la planificación de transporte: las prácticas administrativas, un marco institucional, profesionales, buena comunicación política, los medios de comunicación y el público son algunos de los otros requisitos para un eficaz sistema de planificación.

1.3.1. Teoría de la decisión normativa o racionalidad subjetiva

El problema de la decisión que toma el viajero (viajar-no viajar, modo, ruta), es empleado en la elección de las opciones para un conjunto completo de alternativas y escenarios, con las estimaciones sobre su probabilidad de aparición; la “utilidad” de cada alternativa es cuantificada en términos de beneficios, costos y otros criterios como la protección del medio ambiente, seguridad, etc.

El término “utilidad” se refiere al conjunto de ventajas que encuentra un viajero para realizar el viaje en cierto modo y por cierta ruta, eligiendo siempre lo que más utilidad le representa. Este término se detalla más a fondo en el Capítulo 2.

Sin embargo, para los problemas más reales que están en función de objetivos o restricciones, algunos elementos pueden resultar difíciles de cuantificar o convertir en unidades de medida común, es decir dinero o tiempo. Algunos de los problemas de la aplicación de la teoría de la decisión normativa son:

- La acusación de insensibilidad a las aspiraciones del público.
- Sus altos costos.
- La tendencia mercantil incapaz de comprender y aceptar el tratamiento analítico del problema.⁸

1.3.2. Elección de enfoques de modelado

La aceptabilidad de modelado, o un enfoque particular de modelización, dentro de un estilo de la decisión es muy importante. Los modelos que terminan siendo ignorados por los responsables de la toma de decisiones representan malgastar recursos y esfuerzo.

1. El contexto de toma de decisiones: Esto implica la adopción de una perspectiva particular y una elección de un ámbito o la cobertura del sistema de interés. La elección de perspectiva define el tipo de decisión que será considerado; cuestiones estratégicas o regímenes, incluso problemas operativos específicos. En este caso se toma como influencia determinante el valor de la Función de Utilidad.

⁸ Urban Travel Demand Modeling, Norbert Oppenheim, City University of Nueva York, 1995

2. Precisión necesaria. Estos sistemas son fuertemente influidos por el contexto y la disponibilidad de datos. Sin embargo, a menudo es el caso de que la precisión necesaria sólo discrimina entre un buen plan y un plan menos bueno. En algunos casos pueden ser evidentes, por lo que requiere menos precisión de modelización. Esta tesis toma como influencia en la decisión, la atractividad de un destino, el costo y el tiempo del modo en el que se realizará el viaje.

3. La disponibilidad de datos adecuados: su estabilidad y las dificultades en la proyección de sus valores futuros. Puede ser que haya escasez de datos disponibles; en otros casos, la confiabilidad de la información es puesta en duda debido a una metodología de recopilación mal diseñada o mal aplicada. Esto nos lleva a tener menos confianza en los resultados de un modelo, porque el sistema puede no ser lo suficientemente estable.

4. El estado del arte en la elaboración de modelos; para determinado tipo de intervenciones en el sistema de transporte. Esto a su vez puede subdividirse en:

- Comportamiento del presupuesto para la investigación.
- Matemáticas y equipo.
- Disponibilidad de algoritmos de buena solución.

5. Los recursos disponibles para el estudio, entre los que se encuentra dinero, datos, software y hardware del equipo, habilidades técnicas, etc.

Dos tipos de recursos que vale la pena destacar aquí son el tiempo y el nivel de las comunicaciones entre los responsables de la toma de decisiones y el público.

Si se considera limitado el tiempo para analizar y tomar una elección, se necesita un buen flujo de información para proporcionar asesoramiento puntual.

Un buen nivel de comunicación con los tomadores de decisiones y el público ayuda a aliviar este problema: menos expectativas poco realistas acerca de nuestra capacidad para modelar con precisión el transporte en perspectiva de desarrollo.

6. Requisitos de tratamiento de datos. Este aspecto se utiliza para interpretar las dimensiones de proyecto en base a una pregunta muy sencilla; "¿de qué tamaño es el equipo necesito?", la respuesta a esa pregunta hoy no es muy grande, una buena microcomputadora dará solución en la mayoría de los casos. El verdadero cuello de botella en el procesamiento de datos es la capacidad humana para recopilar, descifrar códigos, conocer los datos de entrada, ejecutar los programas e interpretar el resultado.

7. Los niveles de formación y capacitación de los analistas; Los costos de capacitación suelen ser bastante altos; por ende a veces es mejor usar un modelo existente que se comprenda y se ejecute de una manera más fácil.

Este aspecto es cómo una receta para la innovación y el progreso; sin embargo, debe ser siempre posible pasar algún tiempo acumulando puntos fuertes en las nuevas técnicas avanzadas sin rechazar la experiencia adquirida con modelos anteriores.

Capítulo 2 Metodología

Objetivos del capítulo

1. Explicar los pasos a seguir para el planteamiento y la solución del modelos de demanda de transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México.
2. Definir la simulación utilizando desde el punto de vista sistémico.
3. Mencionar y explicar la función de utilidad como el punto de partida para modelar la demanda de un sistema de transporte en función de las variables, tiempo, costo y distancia de traslado.

2.1 Selección de modelo

La modelización de sistemas de transporte ha desarrollado varias metodologías para desarrollar los modelos con base en la información existente, requerida y la exactitud de los mismos.

El modelo más utilizado desde la década de los 1950's ha sido el llamado "Método de los Cuatro Pasos". Este método obtiene su nombre debido a que define el viaje en cuatro niveles:

- A) Tomar la decisión de viajar, "realizar o no el viaje".
- B) A dónde, "destino".
- C) Por qué medio, "modo".

D) La ruta, “selección de ramas”.

Este modelo analiza uno por uno los niveles con los que el viajero va tomando decisiones, es decir, el viajero toma las decisiones una por una según los niveles mencionados hasta definir cómo es que realizará el viaje si es que decidió realizarlo.

El Método de los Cuatro Pasos es tomado por Norbert Oppenheim para formular un modelo agregado, que involucra todas las decisiones en un mismo nivel, brindando la opción de involucrarlos todos o descartar los que no sean relevantes según el objetivo del estudio.

Estas modificaciones resultan convenientes para este texto, ya que elimina el cuarto nivel de decisión (selección de ramas), que va más allá del alcance del estudio en curso.

2.2 Procedimiento de modelado

A continuación se enuncian los pasos para el desarrollo del modelo de transporte. Con el fin de explicar cada uno de ellos para un mejor entendimiento.

Paso 1 Se obtienen los valores determinísticos de costo tiempo y demanda reales (c_{ij}, t_{ij}, D_{ij}) de viajes por origen-destino, mismos que se utilizarán para la obtención de los parámetros β, α_{ij} y τ por medio de una calibración que se detalla más adelante.

Después será posible calcular las probabilidades de los viajes P_{ij} .

$$P_{ij} = \frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}} \dots \dots \dots i$$

Donde:

P_{ij} = probabilidad del viaje al destino j dado el origen i .

α_j = atractividad del destino j .

β = factor relacionado con la varianza en la distribución Gumbel.

c_{ij} = costo de la alternativa desde i hasta j .

τ = relación tiempo dinero.

t_{ij} = tiempo de alternativa desde i hasta j .

i = origen

j =destino

Paso 2 Dada la demanda D_{ij} obtenida, la cantidad de viajeros se distribuye por tres modos de transporte: individual, infraestructura y resto de los modos. Nuevamente se realizará una calibración con la que se obtendrá el valor de los parámetros " γ, A_m ", para conocer la probabilidad de la demanda D_{ijm} de escoger un modo de transporte tomando en cuenta lo siguiente.

En esta calibración también se iguala la probabilidad de un viaje dado un modo P_{ijm} con la probabilidad observada o real de un viaje dado un modo \bar{P}_{ijm} .

$$A_m = c_{ijm} + \tau t_{ijm} \dots \dots \dots ii.$$

Donde:

A_m = atractividad del modo.

τ = relación dinero tiempo.

t_{ijm} = tiempo de alternativa desde i hasta j dado un modo m .

c_{ijm} = costo de alternativa desde i hasta j dado un modo m .

Con lo anterior la probabilidad de escoger un modo P_m .

$$P_m = \frac{e^{\gamma A_m}}{e^{\gamma A_1} + e^{\gamma A_2} + \dots + e^{\gamma A_M}} \dots \dots \dots iii.$$

Donde:

P_m = proporción de uso del modo.

γ = factor relacionado con la varianza en una distribución logística nominal.

Paso 3 Una vez obtenidas las probabilidades de viajes P_{ij} , se deben hacer las pruebas de independencia de datos para los tiempos y costos (c_{ij}, t_{ij}), dichas pruebas se determinan con una prueba de corridas con puntos giratorios⁹ y alrededor de la mediana¹⁰.

⁹ La prueba del punto giratorio mide el número de tiempos de cambios de dirección de la serie (vea *Johnson, Kotz, y Kemp* 1992). Si hay demasiados o pocos puntos giratorios, la aleatoriedad de la serie se rechaza.

A su vez también se hará ajuste de los datos considerando tres pruebas de bondad de ajuste que son (Chi Cuadrada, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling) para los datos de tiempo y costo, de ésta manera se obtiene un modelo con datos probabilísticos.

De esta manera se introducen los datos en el modelo de Transporte.

La prueba “Chi Cuadrada” consiste en separar los datos observados en intervalos, después calcula el valor *esperado* para cada intervalo de la distribución ajustada. El resultado se compara con un valor estándar de la Chi-cuadrada con los apropiados grados de libertad y nivel de confianza. Al final, la prueba de bondad *rechaza* o *acepta* la hipótesis.

Dicho modelo será sometido a simulación empleando un escenario en los trece distritos que comprenderá la línea cuatro del metrobús, variando los costos y tiempos de viaje por modo (c_{ijm}, t_{ijm}) , la premisa básica es disminuir el tiempo de traslado del modo “infraestructura” y mantener un costo c_{ijm} que propicie el uso del transporte por metrobús.

Paso 4 Con los datos de $c_{ijm}, t_{ijm}, A_m, \gamma$ y τ se puede obtener la demanda; la probabilidad por modo (D_{ijm}, P_{ijm}) como se enuncia a continuación:

$$P_{ijm} = \left[\frac{e^{\gamma A_m}}{e^{\gamma A_1} + e^{\gamma A_2} + \dots + e^{\gamma A_M}} \right] \left[\frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ijm} - \tau t_{ijm})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ijm} - \tau t_{ijm})}} \right] \dots \dots iV$$

$$D_{ijm} = D_i \left[\frac{e^{\gamma A_m}}{e^{\gamma A_1} + e^{\gamma A_2} + \dots + e^{\gamma A_M}} \right] \left[\frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ijm} - \tau t_{ijm})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ijm} - \tau t_{ijm})}} \right] \dots \dots \dots V$$

Donde:

D_{ijm} = pronóstico teórico de demanda de viajes (origen-destino) dado un modo m .

D_i = número de viajeros en el distrito de origen i .

α_j = de la alternativa desde i hasta j dado un modo m .

τ = relación tiempo dinero.

¹⁰ La prueba de la mediana mide el número de corridas, es decir, sucesiones de números, arriba y abajo de la mediana. La corrida puede ser un solo número arriba o debajo de la mediana, si los números adyacentes a él están en la dirección opuesta o si hay demasiadas o pocas corridas, la aleatoriedad de la serie se rechaza.

t_{ijm} = tiempo de alternativa desde i hasta j dado un modo m .

c_{ijm} = costo de alternativa desde i hasta j dado un modo m .

Dichas probabilidades y demandas serán comparadas con las demandas reales de la muestra para determinar si la demanda de un viaje por modo puede ser afectada por los costos y tiempos de traslado. Si es así, entonces se podrán establecer nuevas tarifas que fomenten el uso de transporte de “infraestructura” en la ciudad de México.

2.3 Simulación de sistemas

2.3.1 Definición y metodología de la simulación de sistemas.

La simulación es el proceso de diseñar el modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema. (Shannon, Robert; Johannes, James D., 1976).

La implementación de la simulación como herramienta para evaluar estrategias presenta ciertas características favorables dependiendo de los recursos disponibles y requerimientos de la investigación. Resuelve problemas trascendentes, permite la inclusión de complicaciones, brinda facilidad y flexibilidad para modificar las condiciones del experimento, es compatible con sistemas de optimización y los experimentos pueden ser repetidos varias veces para conocer los resultados que se obtendrían bajo diversos escenarios.

Sin embargo, la simulación no es siempre la única manera de alcanzar ciertos objetivos y no es aplicable a cualquier tipo de sistemas, por ejemplo, cuando las variables de respuesta resultan ser dependientes entre sí. El desarrollo de un sistema de simulación puede ser demasiado costoso, difícil de desarrollar e interpretar estadísticamente, tardado para realizar un buen análisis del sistema, requerir demasiada potencia de hardware/software para ejecutarse, etc.

Para lograr un estudio de simulación correctamente es recomendable seguir ciertos pasos en nuestro estudio:

- Definición del sistema en estudio; analizar el sistema a modelar y establecer sus alcances, objetivos y resultados con los que se evaluará.
- Formulación del modelo; se construye el modelo definiendo las variables, interacciones entre éstas y bosquejando la programación para la simulación.
- Recolección de datos; se obtiene la información estadística de las variables aleatorias del modelo.

- Generación del modelo; en esta etapa se utiliza algún lenguaje de programación o software de simulación para el procesamiento por computadora del modelo.
- Verificación de los datos; se revisa que el modelo generado cumpla con los requisitos de diseño para los que se elaboró.
- Validación del sistema; se valoran las diferencias entre el funcionamiento del simulador y el sistema real, para lo que se recurre a la opinión de expertos sobre los resultados de la simulación, se compara la exactitud de las predicciones con datos históricos, o resultados conocidos, etc.
- Conducción del modelo: consiste en crear diferentes escenarios con sus propias condiciones, con el fin de conocer cómo se comporta el modelo variando ciertos parámetros de los cuáles el simulador tiene control.
- Presentación de resultados: una vez que se han comprobado las cifras de los resultados y se obtienen cantidades lógicas con la realidad, los resultados pueden ser presentados e interpretados de acuerdo al objetivo de simulación.

La simulación es una herramienta conveniente para el desarrollo de esta tesis porque nos ofrece flexibilidad al modificar variables de entrada (la evaluación de un escenario frente al estado actual del sistema). La figura 6 ilustra el procedimiento.

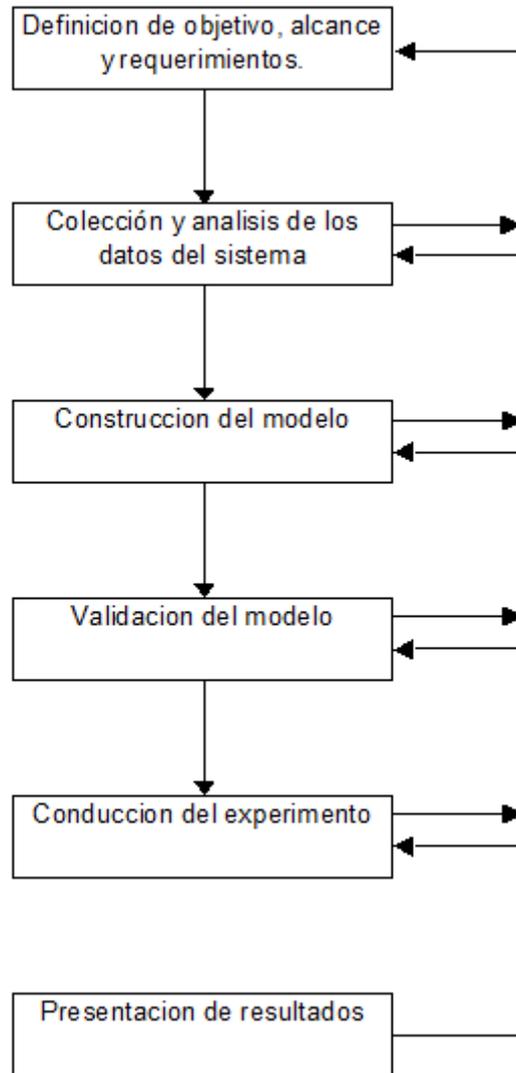


Figura 6. Proceso iterativo de la naturaleza de la simulación

Se ilustran los pasos requeridos para llevar a cabo una simulación utilizando un diagrama de flujo.

2.3.2 Modelo de caja negra desde el punto de vista de la simulación

Cuando se habla de una “caja negra”, en teoría de sistemas, se refiere a un elemento que es estudiado por medio de sus entradas (variables de decisión) y salidas (variables de respuesta),

Se utilizará el modelo de la caja negra, mismo que es empleado para describir cualquier tipo de proceso que genere un producto o servicio, desde una perspectiva de simulación. De ésta manera se puede decir que las entidades de entrada del sistema que se modela en ésta tesis es la utilidad (que está en función del tiempo y costo), mientras que el proceso de transformación (simulación) consiste de actividades, recursos, y controles, para obtener la demanda de transporte al final del proceso.(ver la figura 7).



Figura 7. Entidades del modelo de la caja negra

Se muestra el proceso de la caja negra desde el punto de vista de simulación para su mayor comprensión.

2.4 Modelado de los sistema de transporte

2.4.1 Toma de decisiones y modelización

“El objeto del modelado de la demanda urbana de viajes, es desarrollar metodologías con las cuales uno pueda predecir los valores de dicha demanda en una situación dada.”¹¹

Es necesario explicar las bases de los modelos econométricos y del modelo usado para entender el comportamiento de las ecuaciones y conocer los cambios del comportamiento de la demanda de transporte, como cambia ésta respecto a variables independientes.

Detallar el proceso de decisión para seleccionar las variables del modelo, cuales parecen relevantes, qué externalidades se pueden implementar en el modelo y de qué manera, cuáles por tiempo y costo no son útiles para el modelo. Estos parámetros, modifican el nivel de demanda que se tendrá de un bien en cualquier caso.

Enseguida, se recomienda hacer las pruebas correspondientes para observar su primera relación con la demanda del transporte, mismas que dependerán del tipo de parámetro. Aunque con base en experiencias de modelos anteriores (Kenneth, Ortúzar), estos parámetros ya están definidos y comprobados con anteriores estudios.

La premisa básica del modelo es que; *aunque las variables sean independientes entre sí, en conjunto influyen de manera diferente en la decisión de una persona para viajar.*

Se podrían considerar muchas externalidades dentro del modelo, con lo que se tendrían relaciones paramétricas de interdependencia infinitas. Sin embargo, aunque se realizaran todas las relaciones del modelo, el esfuerzo necesario y recursos para hacerlo, no llevarían a ningún

¹¹ Norbert Oppenheim, *Urban Travel Demand Modeling*, 1995

nivel de detalle significativo, por lo que sólo se considerarán las variables y parámetros necesarios para obtener resultados útiles que sean interpretados con mayor facilidad.

Para lograr representar matemáticamente un sistema de transporte se deben de tomar en cuenta ciertas variables como el modo de transporte, el volumen, tiempo de viaje, congestión de la vía utilizada, etc.

El nivel de profundidad en el análisis depende de lo requerimientos del analista, por ejemplo; el comportamiento de los viajes dada la aglomeración de las vías con su consecuente impacto en costos por pérdida de tiempo, energía, contaminación y otras variables, pueden ser de interés dependiendo de la información que se quiera obtener.

Por otro lado, se puede elaborar un modelo de transporte involucrando sólo tiempos o costos de transporte entre orígenes y destinos. Esta tesis amerita este nivel de profundidad, puesto que se busca conocer de qué manera afectan los costos y los tiempos de traslado en la demanda de transporte en una ruta " ij ".

Antes de elegir un marco de modelización, se debe identificar el enfoque general de la toma de decisiones adoptado en la unidad del país, el Gobierno o la decisión. Hay que reconocer que existen varios estilos de toma de decisiones en la práctica y que no todos ellos utilizan modelización como unidad básica de creación. Para esta tesis se ha elegido el marco del gobierno mexicano que tomará la decisión.

2.4.2 Decisión basada en los planes básicos

Los planes básicos pueden ser razonables cuando el medio ambiente es estable y, por lo tanto, se repiten los problemas de decisión. Tienen la ventaja de informar a todo el mundo lo que se hará. Tienen la desventaja los entornos económicos, sociales y tecnológicos que cambian más rápidamente de lo que se puede adaptar en el plan.

El comportamiento del viajero se puede explicar si se comprenden sus factores humanos, por ejemplo, estructurando la toma de decisiones en cuatro niveles cuando el viajero debe elegir la ruta más conveniente:

Primer nivel: decisión de viajar o no, el viajero toma en cuenta su ubicación geográfica i , el periodo de tiempo (día, hora, etc.), y el motivo del viaje (trabajo, compras, recreación, etc.). La probabilidad de hacer un viaje se denomina P_i .

Segundo nivel: el viajero elige el destino j . La probabilidad de elegir j para un viaje desde i , se denomina probabilidad condicional P_{ij} (probabilidad del viaje al destino j dado el origen i).

Tercer nivel: selección de un modo de traslado m disponibles entre las locaciones i y j . La probabilidad condicional en este caso es P_{ijm} .

Cuarto nivel: el viajero elige la ruta r . La probabilidad condicional se define como P_{ijmr} .

Las ramas que conectan los nodos o zonas del sistema, constituyen el elemento básico del sistema de transporte ya que desde ellas se generalizan atributos como costos de transporte y tiempo. Se numeran 1, 2, 3, ..., a, ..., A. El conjunto de ramas que se seleccionan para llegar desde un nodo i (origen) a un nodo j (destino) conforman una ruta, e intercambiando las ramas elegidas para un mismo origen-destino, podemos definir rutas diferentes, cada una con sus propias características. En la siguiente imagen se ejemplifica cómo se pueden numerar las ramas en un sistema pequeño:

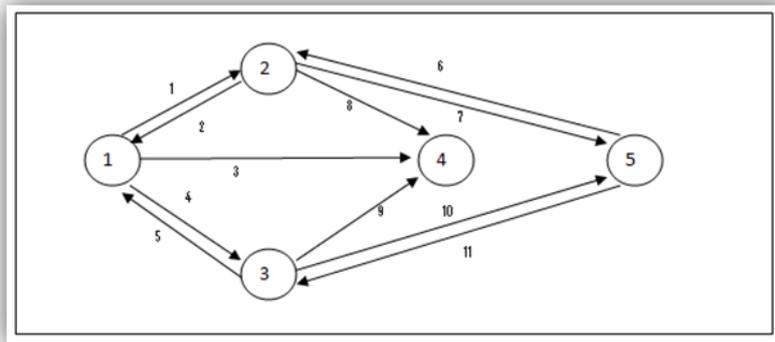


Figura 8. Diagrama de las rutas posibles
Existen más de una ruta para llegar de un origen i a un destino j .

En consecuencia, para definir la relación entre las ramas que se toman y las que se descartan para formar una ruta r , se utiliza la variable de “incidencia rama-ruta” δ_{ijr}^a que resulta ser una función con recorrido.

$$\delta_{ijr}^a = \begin{cases} 1, & \text{si la rama } a \text{ es parte de la ruta } r \text{ entre } i \text{ y } j \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Se utilizarán también variables para caracterizar un origen-destino conjuntamente, mediante el subíndice ij .

Los viajes se distribuyen a partir de su origen, es decir, dado que los viajeros deciden realizar viajes desde su zona inicial, éstos llegarán a varias zonas destino, de forma que:

$$V_i = \sum_j V_{ij} \dots \dots \dots v_i$$

Donde:

V_i = Viajes del punto inicial

V_{ij} = Viaje de un origen i a un destino j .

Posteriormente, se define la selección del modo (infraestructura, individual, otros), en donde se indica el porcentaje de viajeros que usarán cada medio de transporte.

El modelo para varios modos puede expresarse como:

$$P_m = \frac{e^{\gamma A_m}}{e^{\gamma A_1} + e^{\gamma A_2} + \dots + e^{\gamma A_M}} \dots\dots\dots vii$$

Donde:

P_m = proporción de uso del modo m

A_m = atractividad del modo

γ = factor relacionado con la varianza.

Dicho modelo, es una adecuación derivada de un modelo logístico nominal (distribución de probabilidad no lineal, cuya regresión es utilizada para determinar la influencia que tienen diversos factores no numerables ni ordenables, en una variable de estudio), para determinar la demanda de origen-destino.

El tiempo y el costo del viaje son variables que pueden ser estimadas basándose en los tiempos y costos de las ramas de viajes y mediante el uso de la variable de “incidencia rama-ruta”, dicha estimación se logra sumando los tiempos y/o costos de viaje para todas las ramas incluidas en una ruta.

Para los modelados más recientes de transporte esta idea es básica. Sin embargo dichos modelos se adecuan a recursos y objetivos propios de cada proyecto.

2.4.3 La Utilidad

Las variables de costo y tiempo modifican el nivel de demanda que se tendrá de un bien en cualquier caso. Existen diferentes teorías económicas que describen el comportamiento del mercado. La más utilizada en los modelos de demanda de grandes zonas urbanas es la de la utilidad.

La función de la utilidad es básica para definir la combinación de los atributos que tiene un viaje para las personas de una región.

Ante diferentes combinaciones, el viajero puede establecer un orden de preferencias:

1. Comparabilidad o completitud de viaje
2. Transitividad o facilidad de traslado
3. Saturación en el servicio

El viajero siempre elige las alternativas que le ofrecen mayor utilidad, ésta a su vez depende del individuo y de los atributos de la alternativa, tomando en cuenta que varios usuarios pueden valorar los mismos atributos de manera diferente.

Un modelo lógico posee ciertas propiedades que reflejan el crecimiento adquirido de la utilidad al modelar, para comenzar, el caso analizado en esta tesis pertenece al segundo nivel de decisión (ver figura 9).

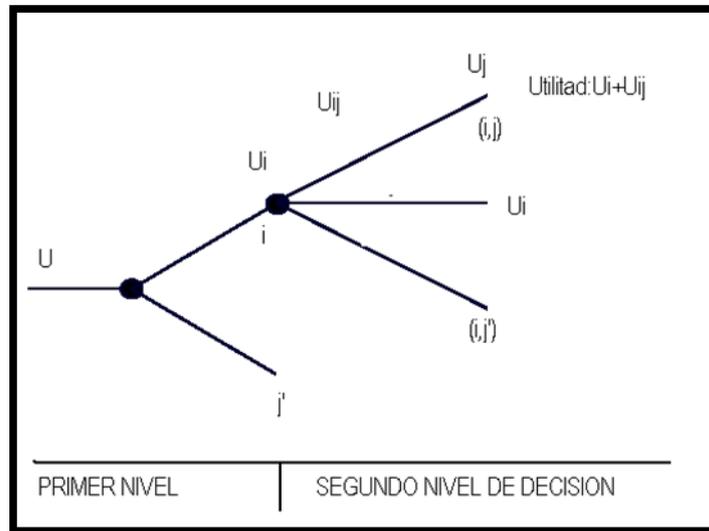


Figura 09. Diagrama de árbol de la utilidad.

Se puede observar cómo la utilidad va creciendo conforme al nivel de decisión (U , U_i , U_{ij}).

Al modelar se añade cierta utilidad aleatoria con su respectiva función de probabilidad, logrando con esto diferenciar un viajero promedio a un viajero individual (que no necesariamente tomará la misma elección, ya que podrá obtener una utilidad diferente). Se define entonces:

$$\tilde{V}_{ij} = \tilde{U}_{ij} + \epsilon_{ij} \dots \dots \dots \text{viii}$$

Donde:

\tilde{V}_{ij} = la utilidad de un viaje individual.

\tilde{U}_{ij} = utilidad que encuentra el viajero promedio.

ϵ_{ij} = conjunto de factores no medibles dentro de la utilidad para un viaje individual.

Según algunos autores, para asignar a ϵ_{ij} su respectiva función de probabilidad se supone un ajuste a la Distribución Normal empleando el Teorema del Límite Central.

Sin embargo, bibliografía más reciente¹² indica que la distribución Normal tiene problemas con el incremento de alternativas de selección, por ello, se recomienda la distribución “Gumbel” o doble exponencial como sustituto, con la ventaja de que las probabilidades de elección resultantes se pueden expresar en una forma más precisa.

Para la función de densidad de probabilidad (f.d.p.) Gumbel, la varianza se expresa como:

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2}{6\beta^2} \dots \dots \dots ix$$

Donde:

β = un factor relacionado con la varianza de ϵ_{ij} .

$$\beta = \frac{\pi}{\sqrt{6\sigma_{\epsilon_{ij}}}} \dots \dots \dots x$$

El papel del factor β puede ser ilustrado dándole valores extremos. Si vale cero, la varianza se convierte en infinita, lo que significa una completa falta de información sobre las utilidades. Si vale infinito, la varianza se convierte en cero, lo que significa una completa certeza de las utilidades.

Por lo que es ideal pensar en una varianza cero, pero eso no se da en casos de la vida real, por lo que un valor promedio para β es aceptable para modelar.

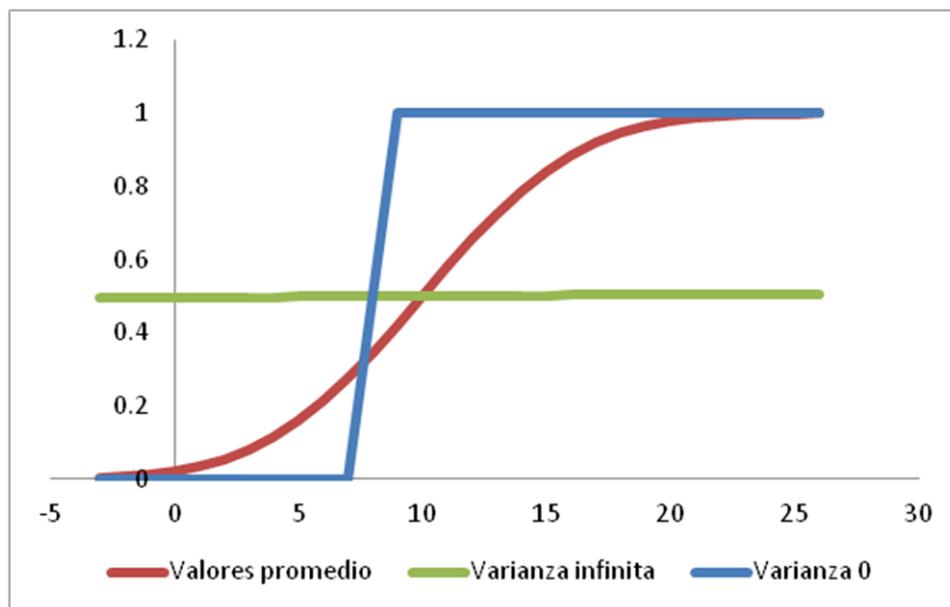


Figura 10. Comportamiento de la varianza con respecto a diferentes valores

Influencia del factor β en la varianza de la F.D.P. Gumbel.

¹² • Urban Travel Demand Modeling, Norbert Oppenheim, City University of Nueva York, 1995

2.4.4 Calibración del modelo

Este subtema explicará la derivación de las ecuaciones que se usarán para la calibración del modelo, en resumen se sabe que habrán 156 restricciones que debe cumplir el sistema de ecuaciones del modelo de 156*156, el cual se resuelve usando software cuyo algoritmo se explica más adelante, mediante la estimación por máxima verosimilitud. El siguiente desarrollo se encuentra en el libro: “Urban Travel Demand Modelling” de Norbert Oppenheim de donde esta tesis toma el modelo.

Si existe una utilidad común en el sistema para un viajero representativo por cada zona de demanda, entonces el costo y el tiempo para un viaje de i a j se expresa como sigue:

c_{ij} = costo de viaje de un origen i a un destino j .

t_{ij} = tiempo de viaje de un origen i a un destino j .

Como se muestra en vi, la probabilidad resultante de escoger un destino j se especifica como:

$$P_{ij} = \frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}} \dots \dots \dots xi$$

Donde:

P_{ij} = probabilidad del viaje al destino j dado el origen i .

α_j = atractividad del destino j .

β = factor relacionado con la varianza de ϵ_{ij} .

c_{ij} = costo de la alternativa desde i hasta j .

τ = relación tiempo dinero.

t_{ij} = tiempo de alternativa desde i hasta j .

Con lo que el pronóstico de la demanda es igual a:

$$D_{ij} = D_i \frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}} \dots\dots\dots xii$$

Donde:

D_{ij} = pronóstico teórico de demanda de viajes (origen-destino).

D_i = número de viajeros en el distrito de origen i .

A continuación se explica el teorema de “Máxima Verosimilitud”, el cual tiene como intención derivar la función de la utilidad para encontrar el valor crítico en el cuál la utilidad es la más grande. Con este análisis se parte hacia el planteamiento de las ecuaciones para la calibración del modelo, la cual permitirá conocer los factores de costo y tiempo de traslado en cada uno de los distritos, así como la atractividad de cada uno de ellos.

Si se asume que los viajeros se comportan de manera independiente y multinomial, entonces:

$$L_i = \frac{D_i! \prod_j P_{j/i}^{\tilde{D}_{ij}}}{\prod_j \tilde{D}_{ij}!} \dots\dots\dots xiii$$

Donde:

L_i = probabilidad de un cierto número de viajeros que van de una zona i a una zona j .

\tilde{D}_{ij} = la muestra real de demandas *origen-destino*.

$P_{j/i}$ = probabilidad del viaje al destino j dado un origen i .

Si D_i es el número de viajeros, cualquier sub-muestra de estos en cada zona de demanda es independiente, la probabilidad de observar la muestra entera de viajeros de todas las zonas, es igual a:

$$L = \prod_i L_i = \prod_i \frac{D_i! \prod_j P_{j/i}^{\tilde{D}_{ij}}}{\prod_j \tilde{D}_{ij}!} \dots\dots\dots xiv$$

Para ajustar el modelo y encontrar sus parámetros es necesaria una estimación de Máxima Verosimilitud.

Las ecuaciones de máxima verosimilitud pueden ser determinadas maximizando el logaritmo de la probabilidad de ocurrencia " Λ " en la muestra.

Los parámetros desconocidos son la solución del siguiente problema.

$$\text{Max } \Lambda = \ln \prod_i \frac{D_i! \prod_j P_{j/i}^{\tilde{D}_{ij}}}{\prod_j \tilde{D}_{ij}!} \dots\dots\dots xv$$

Para poder encontrar el máximo de la ecuación anterior se obtienen derivadas parciales de la ecuación con respecto a cada variable, se iguala a cero y se comprueba que los puntos críticos son máximos, prosiguiendo con las derivaciones e integraciones correspondientes al final se tienen las ecuaciones y restricciones para calibrar el modelo:

$$\sum_i \sum_j (c_{ij} + \tau t_{ij}) \tilde{D}_{ij} = \sum_i \sum_j (c_{ij} + \tau t_{ij}) D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau) \dots\dots\dots xvi$$

Entonces las demás condiciones pueden ser escritas como:

$$\sum_i \sum_j t_{ij} \tilde{D}_{ij} = \sum_i \sum_j t_{ij} D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau) \dots\dots xvii$$

$$\sum_i \sum_j c_{ij} \tilde{D}_{ij} = \sum_i \sum_j c_{ij} D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau) \dots\dots xviii$$

$$\sum_i \tilde{D}_{ij} = \sum_i D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau) \dots\dots xix$$

Para fines prácticos el valor de α_1 se tomará como cero, de esta manera se tendrán 13 ecuaciones con 12 incógnitas para facilitar el cálculo de las alfas restantes tomando en cuenta los distritos por donde pasará la línea 4 del metrobús.

Donde:

$$P_{ij}(\beta, \tau) = \frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}} \dots \dots \dots xx$$

El lado izquierdo de las ecuaciones anteriores expresa los valores observados, mientras que el lado derecho los valores teóricos. Éstos se igualan para generar un sistema de ecuaciones que al resolverlo arroje los valores desconocidos de β, τ y α_j .

2.4.5 Metodología para la calibración de parámetros β, τ, α_j del modelo.

Se trasladaron estas ecuaciones a un libro de Excel mediante un programa compilado con Microsoft Visual Basic, el cual sirve para escribir las ecuaciones y restricciones de cualquier modelo $n \times n$ ajustando sus campos.

Para encontrar los valores de los parámetros α, β y τ de nuestras ecuaciones de probabilidad $P_{ij} = \frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}}$, se recurrió al complemento para Microsoft Excel, Evolver. Este complemento sirve para encontrar óptimos en funciones sencillas o complicadas, trabajando por medio del *Algoritmo Genético*, similar a la solución de un problema de programación lineal solucionado con Solver.

Como función objetivo, se busca igualar la demanda teórica a la demanda observada:

$$D_{ij} = \tilde{D}_{ij}, \text{ donde: } D_{ij} = D_i P_{j/i}.$$

El llamado *Algoritmo Genético* se programa basándose en la teoría evolutiva de Darwin, ya que para solucionar un problema, se genera una solución aleatoriamente, posteriormente es evaluada, y si es mejor que la mejor solución anterior, se conserva “transmitiendo” sus genes, a la siguiente generación, y siendo eliminada si no es tan buena como la anterior, en forma similar a la selección natural, en donde los individuos que han recibido las mayores mejoras en su carga genética sobreviven y las transmiten a las siguientes generaciones, mientras que los cambios genéticos que no han sido favorables llevan a la no reproducción del individuo, y la consiguiente desaparición de su mutación.

En el siguiente diagrama de flujo (figura 12) se representa mejor cómo trabaja el algoritmo en forma generalizada:

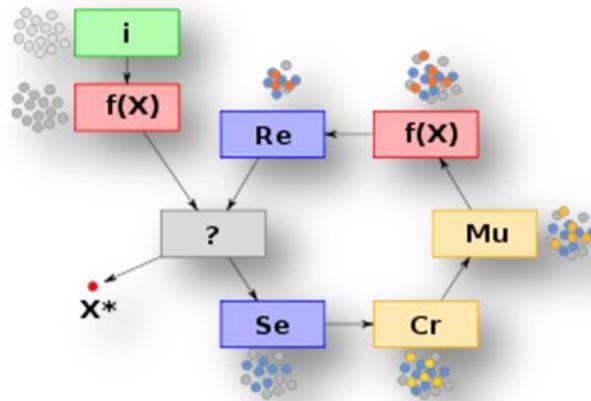


Figura 11. Diagrama de flujo del Algoritmo Genético

Dicho algoritmo se deriva de una analogía con la teoría de la evolución de Darwin.

- ✿ Inicio.- Se genera la población inicial de manera aleatoria, tal como cromosomas que forman una solución inicial propuesta al problema.
- ✿ Evaluación.- a cada cromosoma se le aplica una función de aptitud para saber qué tan buena es la solución.
- ✿ Condición de término.- es la que detendrá el algoritmo una vez que se encuentre la solución óptima.
- ✿ Ciclo
 - ❖ Selección.- se eligen los mejores cromosomas conforme a su aptitud, para ser cruzados en la siguiente generación.
 - ❖ Sobrecruzamiento.- Representa la reproducción sexual, eligiendo dos cromosomas padres que se combinan para formar dos descendientes, es decir, toma valores de las soluciones elegidas y los combina.
 - ❖ Mutación.- modifica al azar parte del cromosoma de los individuos y con eso se alcanzan zonas de búsqueda que no cubría la población actual.
 - ❖ Reemplazo.- ya aplicadas las mutaciones, se seleccionan los mejores individuos para conformar la generación siguiente.
- ✿ X*.- se llega a la solución óptima o que cumple con los criterios establecidos en el periodo de evaluación.

Después de varias iteraciones se encuentran soluciones aproximadas y óptimas para diferentes tipos de problemas. Se seleccionó este tipo de algoritmo debido a la complejidad de los sistemas resultantes, grandes y no-lineales.

En resumen, la calibración del modelo se encargará de encontrar el valor de los parámetros $(\alpha_1, \dots, \alpha_{156}, \beta \text{ y } \tau)$ aplicando las condiciones de las fórmulas *xii*, *xiii* y *xiv* expuestas en este capítulo.

Dichas ecuaciones igualan la demanda observada (datos de la encuesta) con la demanda empírica del modelo planteado por Norbert Oppenheim. De esta manera los tiempos t_{ij} , los costos c_{ij} y la utilidad actúan como variables de decisión dentro de un sistema de ecuaciones no lineales, mientras que las demandas de transporte en cada distrito actúan como variables de respuesta fijas.

Un vez que se obtienen los parámetros $\alpha_1, \dots, \alpha_6, \alpha_{12}, \alpha_{29}, \dots, \alpha_{34}, \beta \text{ y } \tau$ es posible calcular la disponibilidad de pago que tiene cada distrito para el transporte, contemplando el nivel socioeconómico de las viviendas.

Además, se realizarán pruebas de independencia y bondad de ajuste para las variables de decisión (costo y tiempo), con el fin de asignarles una función de distribución, misma que es introducida en un proceso de simulación para obtener una nueva variable de respuesta (demanda de transporte). Esta demanda resulta de la multiplicación de la probabilidad de la utilidad y la población de un distrito, como se explica en la fórmula *viii* de éste capítulo.

Es necesario mencionar que el objetivo de la simulación es conocer cómo puede ser afectada la demanda de transporte si el tiempo y el costo son alterados, quiere decir que en esta etapa final los tiempos y costos serán variados en un porcentaje. Una vez que se tengan los resultados de la simulación se podrá evaluar la factibilidad de un escenario que será planteado en el siguiente capítulo.

2.4.6 Tiempo y costo restante

El tiempo y el costo de transporte varían dependiendo de la distancia al destino, y de los medios y motivos del transporte.

Por ejemplo, el tiempo destinado al transporte hasta los centros de trabajo es un tiempo perdido que se resta del tiempo de descanso y de las horas de sueño de los trabajadores. Además, al tener que realizar la tarea de conducir un automóvil no es posible relajarse, leer un libro, descansar o comunicarse con otros compañeros o amigos.

Esta es la realidad laboral de una buena parte de los trabajadores, que superan diariamente los horarios contratados y de convenio.

De hecho, el 17,21% de los trabajadores emplea más de 1 hora en ir y volver del trabajo, tiempo de transporte que hay que añadir al tiempo de trabajo.

Los atascos y los problemas derivados de los mismos pueden provocar falta de puntualidad a lo largo de la vida laboral de un trabajador, pudiendo acumular muchas horas de trabajo perdidas en el desplazamiento, que en la mayoría de las ocasiones deben recuperarse prolongando su horario de trabajo, al no contemplarse el tiempo de transporte como tiempo de trabajo.

La mayoría de los trabajadores emplean media hora en cada uno de los viajes de ida y vuelta entre el domicilio y el centro de trabajo, independientemente del medio de transporte que utilicen.

El vehículo privado es el transporte más utilizado hasta ahora, con un tiempo de 45 a 60 minutos; a partir de estos tiempos de viaje, los trabajadores eligen modos de desplazamiento más seguros y baratos como el transporte público.

Los desplazamientos no motorizados únicamente están presentes en los recorridos más próximos de hasta 20 minutos, a partir de ese tiempo los modos motorizados captan la mayoría de los viajes.

El tiempo de desplazamiento se distribuye de una manera normal como se muestra en la figura. Con un tiempo medio de 50 minutos.

<i>Número de viajes</i>	<i>válidos</i>	21,535,498
<i>Número de viajes</i>	<i>perdidos</i>	418,659
<i>Media</i>		0:50:19.099
<i>Desviación típica</i>		0:34:36.486
<i>Mínimo</i>		0:01:00.000
<i>Máximo</i>		2:44:00.000

Tabla 6. Parámetros estadísticos del tiempo de viaje

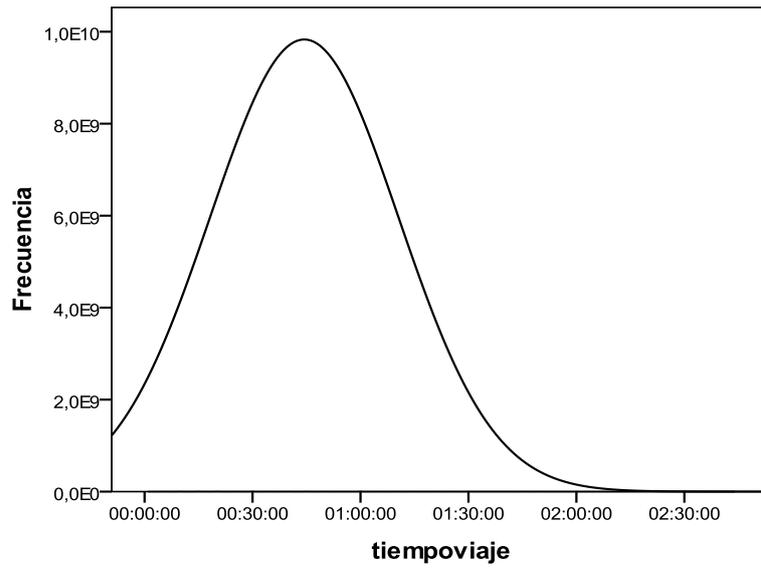


Figura 12. Gráfico de frecuencias del tiempo de viaje.

Capítulo 3 Modelo

Objetivos de capítulo

1. Reportar la metodología de calibración con la ejecución del software; “Evolver-Pallisade Decision Tools” y Excel, para la obtención de los parámetros; β , τ , α_j , A_{im} y γ_i en la línea cuatro del metrobús.
2. Plantear un escenario para la línea cuatro del metrobús modificando los costos y tiempos de viaje, así como reportar la simulación del mismo con el software: “@Risk- Pallisade Decision Tools”.

3.1. Calibración del modelo

Como se mencionó en el capítulo anterior se realizarán dos calibraciones, la primera para obtener los parámetros de demanda de transporte; " β, τ y α_j ". Mientras que la segunda calibración será para obtener los parámetros del modo de transporte; " A_{im} y γ_i ".

3.1.1. Obtención de los datos

Los datos de tiempo y costo de viaje son extraídos de la encuesta Origen Destino 2007, y se capturan en hojas de Excel, para la línea 4 del metrobús los distritos que se tomarán en cuenta son:

Número	Nombre
1	Zócalo
2	Zona Rosa
3	Buenavista
4	Tlatelolco
5	Morelos
6	Obrera
12	Anáhuac
29	Eduardo Molina
30	Romero Rubio
31	Moctezuma
32	Aeropuerto
33	Pantitlán
34	Balbuena

Tabla 7. Distritos con línea 4 del metrobús

Las siguientes imágenes muestran la captura de los datos, Las columnas representan los orígenes i , mientras las filas los destinos j , de tal forma que cada valor en una celda representa una ruta “ ij ”:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
2		1	2	3	4	5	6	12	29	30	31	32	33	34
3	1	4.89	5.28	7.42	3.41	5	3.81	5.07	3.67	7.37	4.63	2	4.58	3.56
4	2	3.58	8.09	7.18	5.34	4.44	4.36	6.43	4.82	7.82	7.32	2	3.54	3.17
5	3	4.79	6.23	5.22	5.68	3.59	3.04	5.07	3.25	3.15	3.39	2	3.63	5.11
6	4	3.94	6.44	5.66	5.88	4.49	4.46	13.2	7.88	13.6	3.69	4.77	5.72	9.95
7	5	4.87	6.68	4.68	4.06	4.57	7.92	3.43	4.67	8.72	4.75	120	3.79	6.29
8	6	3.59	4.9	3.18	6.9	7.36	7.02	6.6	9.97	10.32	21.7	60	10.9	3.77
9	12	3.53	7.35	5.45	10.2	3.45	8.37	4.86	6.5	4.74	22.3	80	4.73	5.98
10	29	6.01	5.74	6.39	5.94	4.41	7.05	4.82	6.07	4.73	7.32	15.77	6.78	4.19
11	30	6.06	6.36	3.54	9.94	8.2	8.01	5.24	4.2	5.33	4.52	2.29	7.59	8.83
12	31	3.71	5.39	3.34	20.7	5.36	5.93	20.7	4.22	4.71	6.89	6.25	5.93	8.45
13	32	3.1	25.3	2	24.5	9.81	9.1	100	3.47	2.16	2.36	28	4.7	4
14	33	5.67	3.76	3.78	19.3	9.95	9.91	5.57	13.8	3.93	4.88	4.43	4.8	5.19
15	34	4.19	4.17	15.6	12.6	13.9	7.77	5.73	4.06	5.52	8.39	18.02	6.11	6.83

Figura 13. Matriz 13X13 de costo c_{ij}

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
2		1	2	3	4	5	6	12	29	30	31	32	33	34
3	1	26	31	38	42	30	27	39	36	47	40	52	56	33
4	2	31	24	29	40	36	42	29	43	55	59	48	64	49
5	3	38	27	22	22	30	41	34	44	53	61	57	57	39
6	4	36	35	21	22	24	39	35	35	33	48	75	73	40
7	5	38	32	31	27	32	36	34	26	37	36	40	55	37
8	6	30	33	43	37	34	22	45	39	47	46	41	56	33
9	12	35	31	30	44	31	45	23	53	48	65	32	81	60
10	29	34	38	32	30	23	29	45	17	24	27	47	36	26
11	30	42	52	36	35	36	51	42	19	16	22	19	33	29
12	31	39	52	43	37	42	41	64	24	25	21	22	33	29
13	32	42	67	47	68	60	45	80	50	22	17	19	29	29
14	33	53	59	48	54	46	61	67	49	30	28	26	25	42
15	34	34	47	42	41	39	31	51	29	35	28	30	42	20

Figura 14. Matriz 13X13 tiempo t_{ij}

	A	B	C
1	i	Di	
2	1	49838	49838
3	2	37194	37194
4	3	75235	75235
5	4	80232	80232
6	5	36904	36904
7	6	73838	73838
8	12	77696	77696
9	29	54949	54949
10	30	64246	64246
11	31	62431	62431
12	32	82905	82905
13	33	77110	77110
14	34	88724	88724
15	ΣDi	861302	861302

Figura 15. Matriz 1X13 de número de viajes D_i

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Đij	1	2	3	4	5	6	12	29	30	31	32	33	34	ΣĐij=
2	1	37706	4739	1539	179	1838	1888	203	362	52	172	368	792		49838
3	2	2800	27184	2651	466	814	1074	1744	174		64	168	55		37194
4	3	4654	3114	57858	3049	3438	480	1434	252	86	491	104	275		75235
5	4	3220	3460	6091	59874	2392	2190	1247	518	349	104	153	537	97	80232
6	5	2030	925	1949	1138	27912	293	496	1011	320	222	76	479	53	36904
7	6	7325	3777	1268	1003	1037	55275	937	157	57	668	683	1480	171	73838
8	12	1857	2684	2795	534	2462	560	66115			240	196	253		77696
9	29	3078	1146	849	769	3477	491	1005	40189	824	771	337	1789	224	54949
10	30	3086	1311	637	879	1778	811	265	4235	45422	3185	416	1710	511	64246
11	31	2870	2111	650	161	1358	706	284	629	1244	46369	3020	2550	479	62431
12	32	3850	1898	731	184	723	1641	1288	320	300	2135	66202	2588	1045	82905
13	33	4651	2517	841	615	1024	1320	860	720	162	667	1038	62556	139	77110
14	34	4536	1988	382		1379	1612	700	237	81	474	2104	1147	74084	88724
15															861302

Figura 16. Matriz 13X13 Demanda Observada \bar{D}_{ij}

3.1.2. Primera calibración (β, τ, α_j).

Para llevar a cabo la calibración se emplearon tablas en Excel, en las cuales se escribieron las matrices de tiempo, costo, población, demanda observada y las ecuaciones de calibración.

Las columnas representan los orígenes i , mientras las filas los destinos j .

La siguiente figura 17 muestra la fórmula de la distribución exponencial “Extreme Value” (Gumbel) que se utilizará para expresar la utilidad en función de $\alpha_j, \beta, c_{ij}, \tau$ y t_{ij} .

Dicha matriz es de 13X13 y tiene por nombre “Matrices” en el archivo del modelo planteado Microsoft en Excel. Mientras que la hoja “Factores” corresponde a los valores que se obtienen al final de la calibración para α_j, β y τ .

	1	2	3	4	5	6	12	29	30	31	32	33	34
1	1	2	3	4	5	6	12	29	30	31	32	33	34
2	2.225E-308	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1.92E-302	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	5.29E-301	6.6E-242	1.86E-241	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	3.35E-258	5.29E-270	2.15E-295	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	#NUM!	0	0	0	1.79E-300	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	2E-235	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1.94E-280	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1.36E-300	5.7E-218	1.723E-287	0	3E-144	1.13E-229	3.41E-263	0	0	3.1E-254
10	0	0	0	0	0	0	0	5.17E-218	7.37E-181	9.46E-254	7.02E-220	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1.65E-269	4.8E-281	7.55E-231	1.72E-243	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	4.68E-246	8.89E-186	9.43E-185	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#NUM!	5.11E-290	1.22E-277	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.6E-263

Figura 17. Matriz 13X13 $e^{(\alpha_j - \beta c_{ij} - \tau t_{ij})}$

$$= \text{EXP}(-\text{Costo DEST}!C4 * \text{Factores}!\$B\$1 + \text{Factores}!\$A4 - \text{Factores}!\$B\$2 * \text{Tiempo DEST}!C3)$$

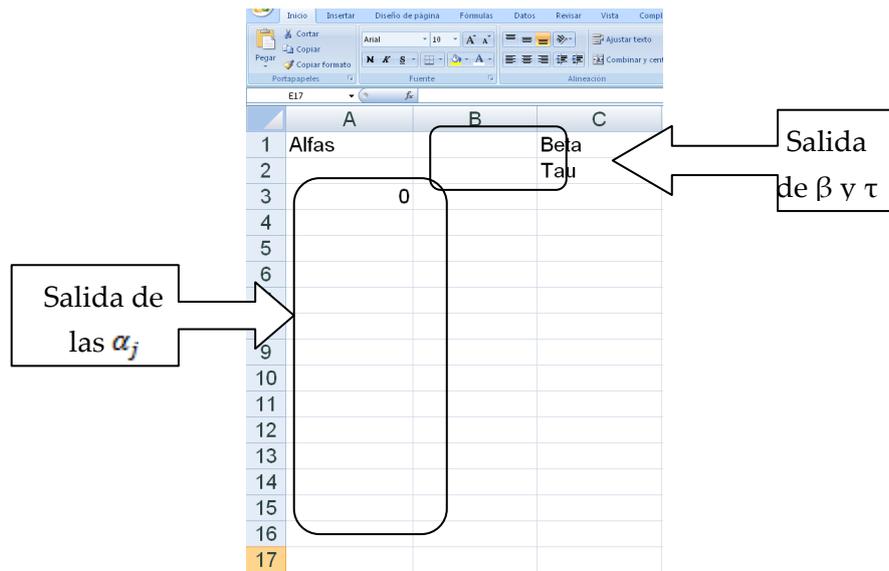


Figura 18. Hoja “Factores” dentro del archivo de modelo en Excel
 Valores de $\alpha_1, \dots, \alpha_{13}$ (donde $\alpha_1 = 0$), β y τ

Siguiendo la lógica de modelado, la figura 19 muestra la restricción de ecuaciones para la obtención del parámetro β . En cada celda el costo se multiplica por la población o número de viajes " D_i " y por la probabilidad de un viaje dado un origen i y un destino j .

Con dicha matriz se tiene el lado derecho de la ecuación *xviii* expresada en el capítulo dos (valor teórico) y también es de 13X13:

$$\sum_i \sum_j c_{ij} \bar{D}_{ij} = \sum_i \sum_j c_{ij} D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau) \dots \dots \dots xviii$$

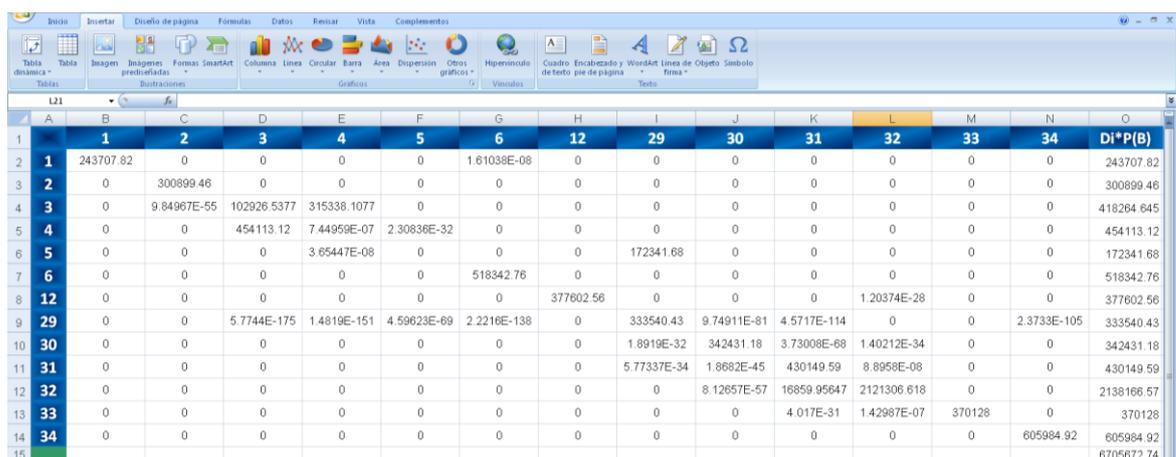


Figura 19. Matriz 13X13 para calcular β , $\sum_{ij} c_{ij} D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau)$
 ='Costo BASE'!B3*Poblacion!\$B2*(Matrices!B2/SUMA(Matrices!\$B2:\$N2))

Para plantear el lado izquierdo de la ecuación *xviii* (valor observado) basta multiplicar la matriz de demanda de viajes observada " \tilde{D}_{ij} " por la matriz de costo de viaje " c_{ij} ", así se tiene la primera de tres restricciones:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		1	2	3	4	5	6	12	29	30	31	32	33	34	$\sum D_{ij}(t_{ij})$
2	1	184382.34	25021.92	11419.38	610.39	9190	7193.28	1029.21	1328.54	383.24	796.36	736	3627.36	0	245718.02
3	2	10024	219918.56	19034.18	2488.44	3614.16	4682.64	11213.92	838.68	0	468.48	336	194.7	0	272813.76
4	3	22292.66	19400.22	302018.76	17318.32	12342.42	1459.2	7270.38	819	270.9	1664.49	208	998.25	0	386062.6
5	4	12686.8	22282.4	34475.06	352059.12	10740.08	9767.4	16435.46	4081.84	4746.4	383.76	729.81	3071.64	965.15	472424.92
6	5	9886.1	6179	9121.32	4620.28	127557.84	2320.56	1701.28	4721.37	2790.4	1054.5	9120	1815.41	333.37	181221.43
7	6	26296.75	18507.3	4032.24	6920.7	7632.32	388030.5	6184.2	1565.29	588.24	14502.28	40980	16087.6	644.67	531972.09
8	12	6555.21	19727.4	15232.75	5446.8	8493.9	4687.2	321318.9	0	0	5342.4	15680	1196.69	0	403681.25
9	29	18498.78	6578.04	5425.11	4567.86	15333.57	3461.55	4844.1	243947.23	3897.52	5643.72	5314.49	12129.42	938.56	330579.95
10	30	18701.16	8337.96	2254.98	8737.26	14579.6	6496.11	1389.6	17787	242099.26	14396.2	952.64	12978.9	4512.13	353221.8
11	31	10647.7	11376.29	2171	3334.31	7278.88	4186.58	5878.8	2654.38	5859.24	319482.41	16875	15121.5	4047.55	410915.64
12	32	11935	47981.44	1462	4500.64	7092.63	14933.1	128800	1110.4	648	5038.6	1853656	12163.6	4180	2093501.4
13	33	26371.17	9463.92	3178.98	11863.35	10188.8	13081.2	4790.2	9964.8	636.66	3254.96	4598.34	300288.8	721.41	398382.59
14	34	19005.84	8289.96	5943.92	0	19099.15	12525.24	4011	962.22	447.12	3976.86	37914.08	7008.17	505993.72	625177.28
15															6705672.7

Figura 20. Matriz 13X13 de costo por demanda observada $\sum_{ij} c_{ij} \tilde{D}_{ij}$
 =Demanda!B2*Costo BASE!B3

Lo que sigue es plantear la segunda restricción para obtener el parámetro τ . En cada celda el tiempo se multiplica por la población o número de viajes " D_i " y por la probabilidad de un viaje dado un origen i y un destino j .

Con dicha matriz se tiene el lado derecho de la ecuación *xvii* expresada en el capítulo dos (valor teórico):

$$\sum_i \sum_j t_{ij} \tilde{D}_{ij} = \sum_i \sum_j t_{ij} D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau) \dots xvii$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		1	2	3	4	5	6	12	29	30	31	32	33	34	$D_i * P(B)$
2	1	49838	0	0	0	0	2.53803E-08	0	0	0	0	0	0	0	49838
3	2	0	1153014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1153014
4	3	0	3.79441E-54	571814.0882	2220690.899	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2792504.997
5	4	0	0	1765104	2.78726E-06	1.54234E-31	0	0	0	0	0	0	0	0	1765104
6	5	0	0	0	1.98025E-07	0	0	0	1291640	0	0	0	0	0	1291640
7	6	0	0	0	0	0	2658168	0	0	0	0	0	0	0	2658168
8	12	0	0	0	0	0	0	3496320	0	0	0	6.16914E-29	0	0	3496320
9	29	0	0	2.711E-174	1.0977E-150	3.23091E-68	1.4181E-137	0	2912297	9.89338E-80	4.0590E-113	0	0	3.3985E-104	2912297
10	30	0	0	0	0	0	0	0	7.6577E-32	1541904	2.22814E-67	2.87772E-33	0	0	1541904
11	31	0	0	0	0	0	0	0	2.59939E-33	6.34634E-45	1373462	2.70432E-07	0	0	1373462
12	32	0	0	0	0	0	0	0	0	9.40575E-56	150025.0364	1666740.914	0	0	1816765.951
13	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.39936E-30	6.13264E-07	2236190	0	2236190
14	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3726408	3726408
15															26813635.95

Figura 21. Matriz 13X13 para calcular τ , $\sum_{ij} t_{ij} D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau)$
 =Tiempo BASE!B2*Poblacion!\$B2*(Matrices!B2/SUMA(Matrices!\$B2:\$N2))

De nuevo, para obtener el lado izquierdo de la ecuación *xvii* (valor observado) se multiplica la matriz de demanda de viajes observada " \bar{D}_{ij} " por la matriz de tiempo de viaje " t_{ij} ", así se obtiene la segunda restricción:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2	1	37708	9478	4617	716	9190	11328	2436	10498	1560	5332	11776	26136	0	130773
3	2	72800	842704	100738	19572	24420	28998	68016	6264	0	2560	8736	3080	0	1177888
4	3	144274	74736	1677882	121960	123768	20160	41586	10836	4730	28969	4992	17600	0	2271493
5	4	122360	93420	134002	1317228	71760	89790	42398	22792	18497	6344	8721	30609	3783	1961704
6	5	73080	32375	40929	25036	669888	11427	17380	35385	10560	10656	5700	34967	2120	969483
7	6	278350	120864	39308	27081	33184	1989900	31858	4082	2109	24048	27320	81400	6327	2665831
8	12	55710	88572	120185	19758	83708	12320	2975175	0	0	11040	8036	14168	0	3388672
9	29	107730	35526	25470	33836	107787	22095	23115	2130017	39552	50115	10784	144909	13440	2744376
10	30	104924	49818	20384	26370	40894	23519	11925	71995	1090128	85995	19552	61560	13286	1620350
11	31	120540	109772	23400	5635	48888	36006	11928	11951	19904	1020118	57380	84150	13891	1563563
12	32	150150	98696	31433	6808	30366	67281	82432	7680	7500	44835	1456444	85404	30305	2099334
13	33	195342	168639	39527	41820	61440	59400	68800	36000	3564	11339	19722	1814124	4031	2523748
14	34	240408	117292	18336	0	63434	98332	46900	11613	2430	13272	54704	28675	311528	3806924
15															26924139

Figura 22. Matriz 13X13 de tiempo por demanda observada $\sum_j t_{ij} \bar{D}_{ij}$
 =Demanda!B2*"Tiempo BASE"!B2

La tercera y última restricción se utiliza para obtener los valores de las alfas " α_j ". En cada celda se multiplica la población o número de viajes " D_i " por la probabilidad de un viaje dado un origen i y un destino j .

Así se tiene el lado derecho de la ecuación *xix* (valor teórico) expresada en el capítulo dos de ésta tesis. El lado izquierdo de la ecuación corresponde a la matriz " \bar{D}_{ij} " expuesta anteriormente.

$$\sum_i \bar{D}_{ij} = \sum_i D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau) \dots \dots \text{xix}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2	1														
3	2		43108103972	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3		8.8478E+11	9747.872101	27446.1279	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4		0	75235	1.57968E-24	8.07431E-56	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	5		0	0	1.39412E-67	0	0	0	7.4246E-16	0	0	0	0	0	0
7	6		0	0	0	0	4.11251E+69	0	0	0	0	0	0	0	0
8	12		0	0	0	0	0	7.1601E-41	0	0	0	0	0	0	0
9	29		0	0	4.207E-55	1.47368E-69	7.45908E+17	0	1.204E+141	2.9144E-81	3.6006E-78	0	0	1.9693E+28	0
10	30		0	0	0	0	0	0	1.4638E+67	1.3477E-32	7.0582E-69	5.1108E+15	0	0	0
11	31		0	0	0	0	0	0	5.4811E+15	1.026E-132	6.583E-46	1.4647E-08	0	0	0
12	32		0	0	0	0	0	0	0	9.7308E-98	0.75334215	7.7968E+50	0	0	0
13	33		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.6159E-55	9.8171E-89	0	0
14	34		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.2704E+19	0
15			9.27669E+11	84982.8721	27446.1279	8.07431E-56	4.11251E+69	7.1601E-41	1.204E+141	1.3477E-32	0.75334215	7.7968E+50	9.8171E-89	1.9693E+28	1.204E+141

Figura 23. Matriz 13X13 para calcular α_j , $\sum_i \bar{D}_{ij} = \sum_i D_i P_{ij}(\alpha_j, \beta, \tau)$
 =Poblacion!\$B2*Matrices!C3/SUMA(Matrices!\$B\$2:\$N\$2)

Para resolver las ecuaciones y calibrar el modelo por primera vez se utilizará el complemento de Excel: Evolver. A continuación se explican los pasos para ejecutar el programa:

Se establecen las celdas objetivo en la hoja del archivo “Factores” (antes mostrada) donde se darán los resultados de α_j, β y τ al terminar la calibración. La siguiente imagen muestra la ventana de definición del modelo:

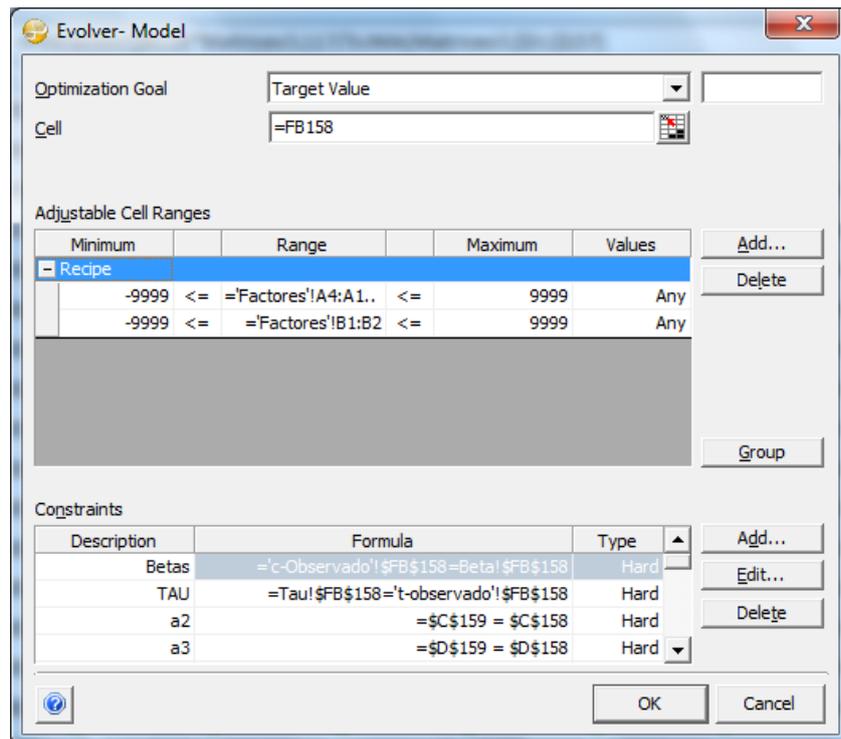


Figura 24. Pantalla de Evolver para la calibración de parámetros.

De igual manera, las restricciones ya expuestas anteriormente se definen en la ventana de Evolver (Figura 26).

Optimization Goal: la meta de optimización, que da las opciones de buscar un máximo, un mínimo o un valor exacto (cuando dicho valor es alcanzado, la optimización o calibración termina y se recopilan los valores encontrados de los parámetros). Se escoge “Target Value”, valor exacto, ya que se busca satisfacer la igualdad:

Cell: es el espacio que indica la celda que contiene el valor exacto a alcanzar.

Adjustable Cell Ranges: se indican las celdas (unitaria o rango de celdas) cuyo valor será variable y recopilable.

- Range. En este caso se trata de dos rangos de celdas, uno para obtener las α_j y otro para obtener β y τ .

- Minimum, Maximum. Establecen los valores máximo y mínimo que pueden obtener las celdas elegidas. Paara estecaso puede adquirir cualquier valor.
- Values. Elige el tipo de valores que se pueden asignar al rango, sólo enteros o cualquiera (Any).

Constraints: en este cuadro se establecen todas las restricciones que se deben de cumplir en la calibración.

- Description. Una breve descripción de la restricción declarada en el proceso de calibración.
- Formula. La fórmula de Excel con la que se indica la restricción que hay que cumplir, una para β , otra para τ y una para cada α , salvo α_0 que es declarada igual a 0 para que el sistema encuentre solución.
- Type: selecciona el tipo de restricción, Hard (dura, descarta cualquier solución que no cumpla la restricción) o Soft (suave, desfavorece las soluciones que no cumplen la restricción pero es posible que las acepte). Hard es seleccionado, ya que se busca que todas las restricciones sean cumplidas.

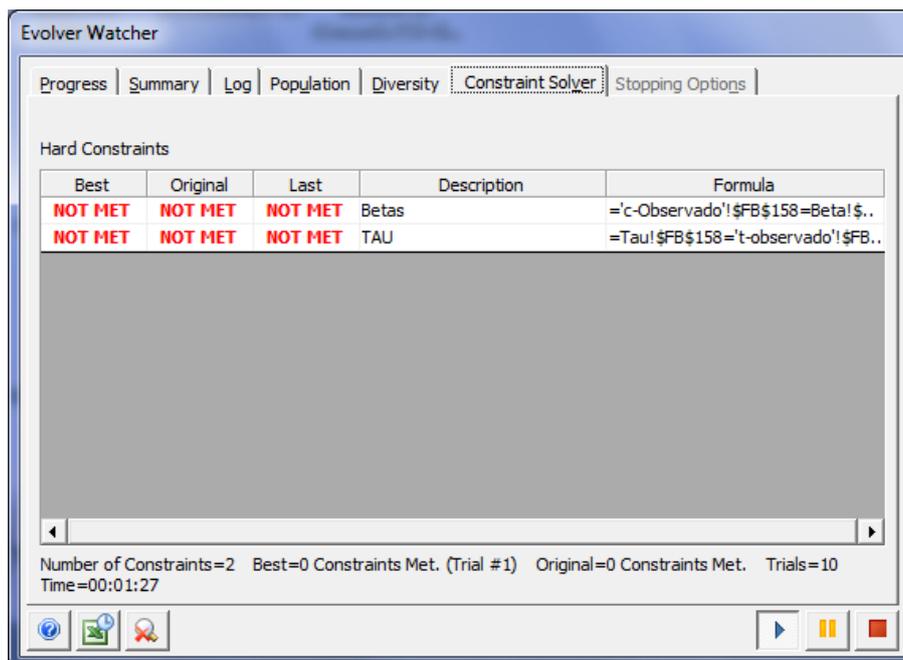


Figura 25. Pantalla de progreso de calibración en Evolver

3.1.3. Segunda calibración (A_{im} y γ_i)

Esta calibración tiene como objetivo determinar los parámetros A_{im} y γ_i , siendo A_{im} la atraktividad del modo de viaje dado un origen, ya sea carro, bicicleta, autobús, etc. mientras que γ es un factor relacionado con la varianza como β . Por fines prácticos sólo se tomarán en cuenta tres modos; individual, infraestructura y otros.

Con lo anterior se tendrán un γ_1, A_{11}, A_{12} y A_{13} para el distrito 1, γ_2, A_{21}, A_{22} y A_{23} para el distrito 2 y así sucesivamente.

En la siguiente imagen se muestra la hoja “Modal Split” en la cual se introducen las fórmulas para la segunda calibración:

$$A_{im} = \varepsilon_m + C_{ijm} + \tau t_{ijm} \dots \dots \dots vii.$$

Donde ε_m = la atraktividad del modo de transporte

$$P_m = \frac{e^{\gamma A_m}}{e^{\gamma A_1} + e^{\gamma A_2} + \dots + e^{\gamma A_M}} \dots \dots \dots viii.$$

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet with the following columns: Orígene, Modo, Costo, Distrito, Factor, and Valo. The rows are organized by district (Distrito) and mode (Modo). Callouts point to specific data points: 'Modos' points to the 'Modo' column, 'Costo' points to the 'Costo' column, 'Distrito' points to the 'Distrito' column, 'Salida de los factores Gama' points to the 'Factor' column, 'Orígene' points to the 'Orígene' column, and 'Salida de los factores Am' points to the 'Valo' column.

Orígene	Modo	Costo	Distrito	Factor	Valo
1	INDIVIDUAL	12.85675878	1		alpha1
1	INFRAESTRUCTURA	3.29576198	1		alpha2
1	RESTO DE LOS MODOS	2.750011959	1		alpha3
1	INDIVIDUAL	7.354300028	1	gama	alpha1
1	INFRAESTRUCTURA	3.535728509	1		alpha2
1	RESTO DE LOS MODOS	3.103519306	1		alpha3
2	INDIVIDUAL	6.309059156	2	gama	alpha1
2	INFRAESTRUCTURA	4.389294752	2		alpha2
2	RESTO DE LOS MODOS	2.843931416	2		alpha3
2	INDIVIDUAL	5.340462133	2	gama	alpha1
2	INFRAESTRUCTURA	5.436568218	2		alpha2
2	RESTO DE LOS MODOS	4.928961164	2		alpha3
3	INDIVIDUAL	9.254515297	3	gama	alpha1
3	INFRAESTRUCTURA	3.785814156	3		alpha2
3	RESTO DE LOS MODOS	3.68700959	3		alpha3
3	INDIVIDUAL	4.467331146	3	gama	alpha1
3	INFRAESTRUCTURA	3.701226192	3		alpha2
3	RESTO DE LOS MODOS	2.848409041	3		alpha3
4	INDIVIDUAL	6.531477835	4	gama	alpha1
4	INFRAESTRUCTURA	4.409730513	4		alpha2
4	RESTO DE LOS MODOS	3.059420708	4		alpha3
4	INDIVIDUAL	4.481048387	4	gama	alpha1
4	INFRAESTRUCTURA	4.632284898	4		alpha2
4	RESTO DE LOS MODOS	6.634023128	4		alpha3
5	INDIVIDUAL	14.28472084	5	gama	alpha1
5	INFRAESTRUCTURA	4.635041466	5		alpha2
5	RESTO DE LOS MODOS	4.364539808	5		alpha3
5	INDIVIDUAL	7.159122807	5	gama	alpha1
5	INFRAESTRUCTURA	3.385236793	5		alpha2
5	RESTO DE LOS MODOS	10.80170334	5		alpha3
6	INDIVIDUAL	11.61323981	6	gama	alpha1
6	INFRAESTRUCTURA	3.772487593	6		alpha2
6	RESTO DE LOS MODOS	3.883126739	6		alpha3
6	INDIVIDUAL	6.304150825	6	gama	alpha1

Figura 26.1 Plantilla “Modal Split”

La ecuación ix expuesta en el capítulo dos se utiliza para la restricción de la segunda calibración, misma que se iguala a la probabilidad observada de un viaje ij dado un modo " \hat{P}_{ijm} ":

$$P_{ijm} = \left[\frac{e^{\gamma A_m}}{e^{\gamma A_1} + e^{\gamma A_2} + \dots + e^{\gamma A_M}} \right] \left[\frac{e^{(\alpha_j - \beta c_{ijm} - \tau t_{ijm})}}{\sum_j e^{(\alpha_j - \beta c_{ijm} - \tau t_{ijm})}} \right] \dots ix$$

$$P_{ijm} = \hat{P}_{ijm}$$

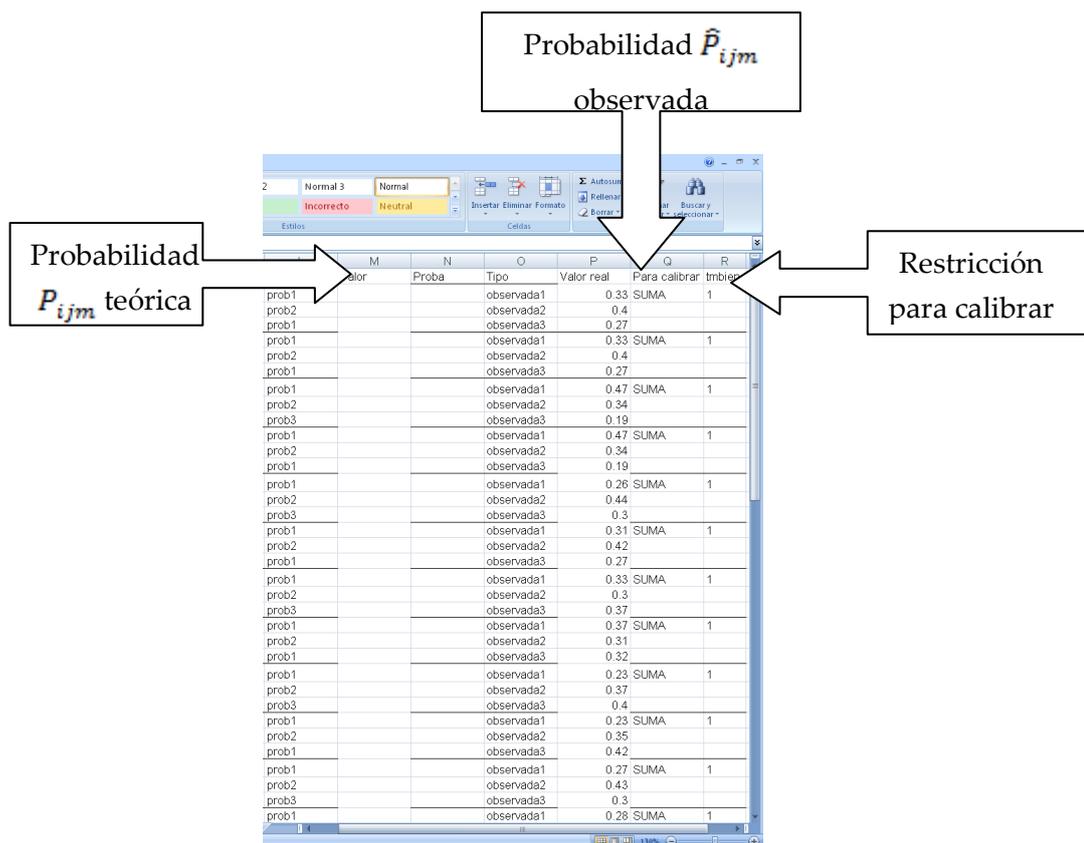


Figura 26.2 Plantilla “Modal Split”

Lo que sigue es meter las restricciones y ecuaciones en la ventana de modelado de Evolver para obtener los valores desconocidos (A_{im} y γ_i), la forma de introducirlos es como se hizo en la primera calibración. La diferencia radica en que cada distrito se calibra por separado. A continuación se explican los pasos para ejecutar el programa:

Se establecen las celdas objetivo en la hoja del archivo “Factores” (antes mostrada) donde se darán los resultados de A_m y “ γ ” al terminar la calibración. La siguiente imagen muestra la ventana de definición del modelo:

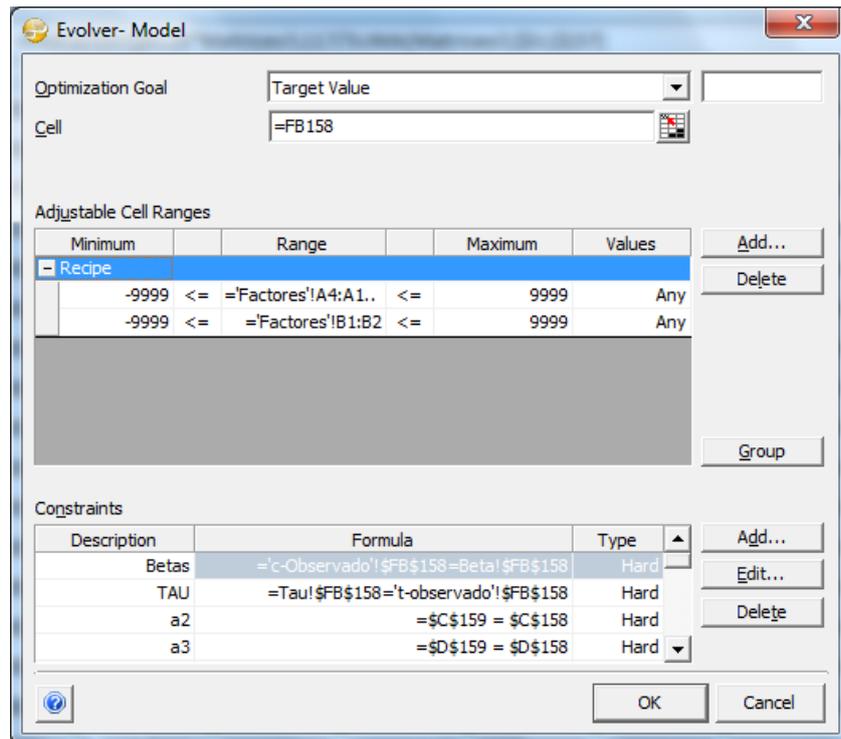


Figura 27. Pantalla de Evolver para la calibración de parámetros.

De igual manera, las restricciones ya expuestas anteriormente se definen en la ventana de Evolver (Figura 26).

Optimization Goal: la meta de optimización, que da las opciones de buscar un máximo, un mínimo o un valor exacto (cuando dicho valor es alcanzado, la optimización o calibración termina y se recopilan los valores encontrados de los parámetros). Se escoge “Target Value”, valor exacto, ya que se busca satisfacer la igualdad:

Cell: es el espacio que indica la celda que contiene el valor exacto a alcanzar.

Adjustable Cell Ranges: se indican las celdas (unitaria o rango de celdas) cuyo valor será variable y recopilable.

- **Range.** En este caso se trata de dos rangos de celdas, uno para obtener las A_m y otro para obtener γ .

- Minimum, Maximum. Establecen los valores máximo y mínimo que pueden obtener las celdas elegidas. Paara estecaso puede adquirir cualquier valor.
- Values. Elige el tipo de valores que se pueden asignar al rango, sólo enteros o cualquiera (Any).

Constraints: en este cuadro se establecen todas las restricciones que se deben de cumplir en la calibración.

- Description. Una breve descripción de la restricción declarada en el proceso de calibración.
- Formula. La fórmula de Excel con la que se indica la restricción que hay que cumplir, una para “ γ ” y una para cada A_m .
- Type: selecciona el tipo de restricción, Hard (dura, descarta cualquier solución que no cumpla la restricción) o Soft (suave, desfavorece las soluciones que no cumplen la restricción pero es posible que las acepte). Hard es seleccionado, ya que se busca que todas las restricciones sean cumplidas.

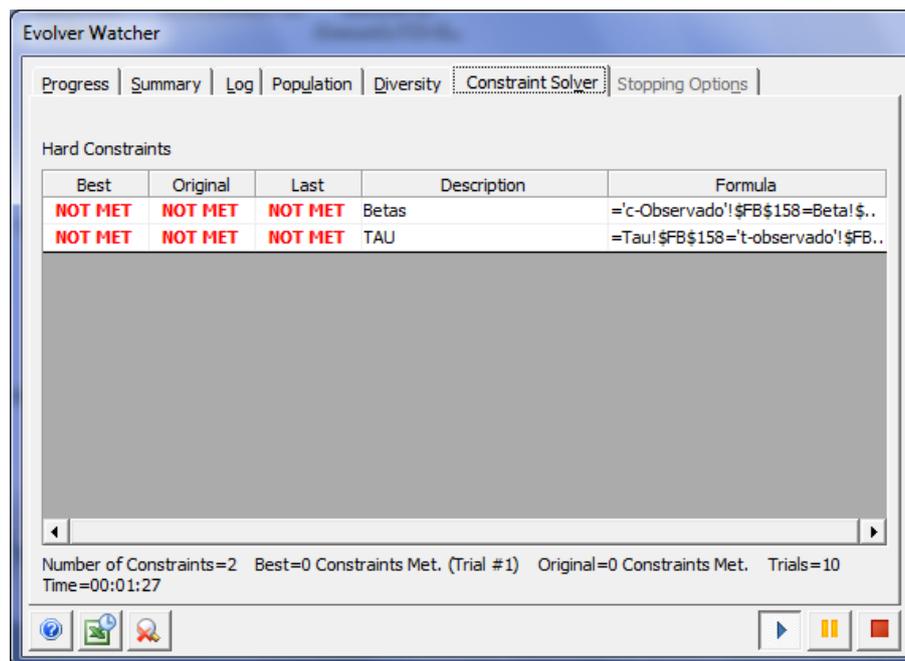


Figura 28. Pantalla de progreso de calibración en Evolver

3.2. Pruebas de independencia de datos y bondad de ajuste

Para usar los datos de costo y tiempo (c_{ij}, t_{ij}) en un modelo de simulación, se deben analizar e interpretar por medio de análisis y pruebas estadísticas.

Dicho esto, los datos históricos (c_{ij}, t_{ij}) podrán proyectarse hacia un futuro en el periodo de tiempo estudiado por la simulación en ésta tesis (febrero del 2012). La

información ayudara a ajustar los datos, para que el futuro pueda obtenerse de los pronósticos de demandas de viaje en una ruta determinada (línea 4 del metrobús).

3.2.1. Pruebas de independencia de los datos c_{ij}, t_{ij}

Antes de a desarrollar una representación de los datos, éstos deben ser analizados para determinar si es conveniente usarlos en un modelo de simulación. Debe determinarse si los datos son independientes o aleatorios (si el valor de una observación no está influenciado por el valor de otra observación dichos datos son independientes).

Se harán dos pruebas gráficas; diagrama de dispersión y autocorrelación de los datos además de dos pruebas de corridas en el programa “Stat-Fit” (prueba de la mediana y prueba de punto giratorio).

En ambas pruebas la hipótesis nula " H_0 " es que los datos son independientes, por lo que si la hipótesis se rechaza los datos son independientes sólo si el nivel de significancia del resultado es muy pequeño, los resultados de las corridas se muestran a continuación:

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
1	Zócalo- Zócalo	Sí	Sí	Sí
2	Zócalo -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
3	Zócalo -Buenavista	Sí	Sí	Sí
4	Zócalo -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
5	Zócalo -Morelos	Sí	Sí	Sí
6	Zócalo -Obrera	Sí	Sí	Sí
7	Zócalo -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
8	Zócalo -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
9	Zócalo -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
10	Zócalo -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
11	Zócalo -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
12	Zócalo- Pantitlán	Sí	Sí	Sí
13	Zócalo -Balbuena	Sí	Sí	Sí

Tabla 8. Resultados de Pruebas de independencia de los costos c_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
14	Zona Rosa - Zócalo	Sí	Sí	Sí
15	Zona Rosa -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
16	Zona Rosa -Buenavista	Sí	Sí	Sí
17	Zona Rosa -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
18	Zona Rosa -Morelos	Sí	Sí	Sí
19	Zona Rosa –Obrera	Sí	Sí	Sí
20	Zona Rosa -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
21	Zona Rosa -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
22	Zona Rosa -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
23	Zona Rosa -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
24	Zona Rosa -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
25	Zona Rosa - Pantalán	Sí	Sí	Sí
26	Zona Rosa -Balbuena	Sí	Sí	Sí
27	Buenavista - Zócalo	Sí	Sí	Sí
28	Buenavista -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
29	Buenavista -Buenavista	Sí	Sí	Sí
30	Buenavista -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
31	Buenavista -Morelos	Sí	Sí	Sí
32	Buenavista –Obrera	Sí	Sí	Sí
33	Buenavista -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
34	Buenavista -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
35	Buenavista -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
36	Buenavista -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
37	Buenavista -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
38	Buenavista - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
39	Buenavista -Balbuena	Sí	Sí	Sí
40	Tlatelolco- Zócalo	Sí	Sí	Sí
41	Tlatelolco -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
42	Tlatelolco -Buenavista	Sí	Sí	Sí
43	Tlatelolco -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
44	Tlatelolco -Morelos	Sí	Sí	Sí
45	Tlatelolco –Obrera	Sí	Sí	Sí
46	Tlatelolco -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
47	Tlatelolco -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí

Tabla 9. Resultados de Pruebas de independencia de los costos c_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
48	Tlatelolco -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
49	Tlatelolco -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
50	Tlatelolco -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
51	Tlatelolco - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
52	Tlatelolco -Balbuena	Sí	Sí	Sí
53	Zona Rosa - Zócalo	Sí	Sí	Sí
54	Morelos -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
55	Morelos -Buenavista	Sí	Sí	Sí
56	Morelos –Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
57	Morelos –Morelos	Sí	Sí	Sí
58	Morelos –Obrera	Sí	Sí	Sí
59	Morelos –Anáhuac	Sí	Sí	Sí
60	Morelos -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
61	Morelos -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
62	Morelos –Moctezuma	Sí	Sí	Sí
63	Morelos –Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
64	Morelos – Pantitlán	Sí	Sí	Sí
65	Morelos –Balbuena	Sí	Sí	Sí
66	Obrera – Zócalo	Sí	Sí	Sí
67	Obrera -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
68	Obrera –Buenavista	Sí	Sí	Sí
69	Obrera –Tlatelolco	Sí	No	Sí
70	Obrera-Morelos	Sí	Sí	Sí
71	Obrera –Obrera	Sí	Sí	Sí
72	Obrera –Anáhuac	Sí	Sí	Sí
73	Obrera -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
74	Obrera -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
75	Obrera –Moctezuma	Sí	Sí	Sí
76	Obrera –Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
77	Obrera – Pantitlán	Sí	Sí	Sí
78	Obrera –Balbuena	Sí	Sí	Sí
79	Anáhuac- Zócalo	Sí	Sí	Sí
80	Anáhuac -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
81	Anáhuac –Buenavista	Sí	Sí	Sí
82	Anáhuac –Tlatelolco	Sí	Sí	Sí

Tabla 10. Resultados de Pruebas de independencia de los costos c_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
83	Anáhuac –Morelos	Sí	Sí	Sí
84	Anáhuac –Obrera	Sí	Sí	Sí
85	Anáhuac –Anáhuac	Sí	Sí	Sí
86	Anáhuac -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
87	Anáhuac -Romero Rubio	Sí	No	Sí
88	Anáhuac –Moctezuma	Sí	Sí	Sí
89	Anáhuac –Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
90	Anáhuac – Pantitlán	Sí	Sí	Sí
91	Anáhuac –Balbuena	Sí	Sí	Sí
92	Eduardo Molina – Zócalo	Sí	Sí	Sí
93	Eduardo Molina -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
94	Eduardo Molina -Buenavista	Sí	Sí	Sí
95	Eduardo Molina -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
96	Eduardo Molina-Morelos	Sí	Sí	Sí
97	Eduardo Molina –Obrera	Sí	Sí	Sí
98	Eduardo Molina -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
99	Eduardo Molina -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
100	Eduardo Molina -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
101	Eduardo Molina -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
102	Eduardo Molina -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
103	Eduardo Molina - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
104	Eduardo Molina -Balbuena	Sí	Sí	Sí
105	Romero Rubio - Zócalo	Sí	No	Sí
106	Romero Rubio -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
107	Romero Rubio -Buenavista	Sí	Sí	Sí
108	Romero Rubio -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
109	Romero Rubio-Morelos	Sí	Sí	Sí
110	Romero Rubio –Obrera	Sí	Sí	Sí
111	Romero Rubio -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
112	Romero Rubio -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
113	Romero Rubio -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
114	Romero Rubio -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
115	Romero Rubio -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
116	Romero Rubio - Pantitlán	Sí	Sí	Sí

Tabla 11. Resultados de Pruebas de independencia de los costos c_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
117	Romero Rubio -Balbuena	Sí	Sí	Sí
118	Moctezuma - Zócalo	Sí	Sí	Sí
119	Moctezuma -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
120	Moctezuma -Buenavista	Sí	Sí	Sí
121	Moctezuma -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
122	Moctezuma-Morelos	Sí	Sí	Sí
123	Moctezuma –Obrera	Sí	Sí	Sí
124	Moctezuma -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
125	Moctezuma -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
126	Moctezuma -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
127	Moctezuma -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
128	Moctezuma -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
129	Moctezuma - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
130	Moctezuma -Balbuena	Sí	Sí	Sí
131	Pantitlán - Zócalo	Sí	Sí	Sí
132	Pantitlán -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
133	Pantitlán -Buenavista	Sí	Sí	Sí
134	Pantitlán -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
135	Pantitlán-Morelos	Sí	Sí	Sí
136	Pantitlán –Obrera	Sí	Sí	Sí
137	Pantitlán -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
138	Pantitlán -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
139	Pantitlán -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
140	Pantitlán -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
141	Pantitlán -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
142	Pantitlán - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
143	Pantitlán -Balbuena	Sí	Sí	Sí
144	Balbuena - Zócalo	Sí	Sí	Sí
145	Balbuena -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
146	Balbuena -Buenavista	Sí	Sí	Sí
147	Balbuena -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
148	Balbuena -Morelos	Sí	Sí	Sí
149	Balbuena –Obrera	Sí	Sí	Sí

Tabla 12. Resultados de Pruebas de independencia de los costos c_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
150	Balbuena –Anáhuac	Sí	Sí	Sí
151	Balbuena -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
152	Balbuena -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena -Balbuena	Sí	Sí	Sí

Tabla 13. Resultados de Pruebas de independencia de los costos c_{ij}

La tabla 14 muestra los resultados de pruebas de independencia del tiempo t_{ij} como sigue:

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
1	Zócalo- Zócalo	Sí	Sí	Sí
2	Zócalo -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
3	Zócalo -Buenavista	Sí	No	Sí
4	Zócalo –Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
5	Zócalo –Morelos	Sí	Sí	Sí
6	Zócalo –Obrera	Sí	Sí	Sí
7	Zócalo -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
8	Zócalo -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
9	Zócalo -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
10	Zócalo -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
11	Zócalo -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
12	Zócalo- Pantitlán	Sí	Sí	Sí
13	Zócalo -Balbuena	Sí	Sí	Sí
14	Zona Rosa - Zócalo	Sí	Sí	Sí
15	Zona Rosa -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
16	Zona Rosa -Buenavista	Sí	Sí	Sí
17	Zona Rosa -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
18	Zona Rosa -Morelos	Sí	Sí	Sí
19	Zona Rosa –Obrera	Sí	Sí	Sí
20	Zona Rosa -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
21	Zona Rosa -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
22	Zona Rosa -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí

Tabla 14. Resultados de Pruebas de independencia de los tiempos t_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
23	Zona Rosa -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
24	Zona Rosa -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
25	Zona Rosa - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
26	Zona Rosa -Balbuena	Sí	Sí	Sí
27	Buenavista - Zócalo	Sí	Sí	Sí
28	Buenavista -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
29	Buenavista -Buenavista	Sí	Sí	Sí
30	Buenavista -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
31	Buenavista -Morelos	Sí	Sí	Sí
32	Buenavista -Obrera	Sí	Sí	Sí
33	Buenavista -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
34	Buenavista -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
35	Buenavista -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
36	Buenavista -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
37	Buenavista -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
38	Buenavista - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
39	Buenavista -Balbuena	Sí	Sí	Sí
40	Tlatelolco- Zócalo	Sí	Sí	Sí
41	Tlatelolco -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
42	Tlatelolco -Buenavista	Sí	Sí	Sí
43	Tlatelolco -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
44	Tlatelolco -Morelos	Sí	Sí	Sí
45	Tlatelolco -Obrera	Sí	Sí	Sí
46	Tlatelolco -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
47	Tlatelolco -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
48	Tlatelolco -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
49	Tlatelolco -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
50	Tlatelolco -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
51	Tlatelolco - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
52	Tlatelolco -Balbuena	Sí	Sí	Sí
53	Zona Rosa - Zócalo	Sí	Sí	Sí
54	Morelos -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
55	Morelos -Buenavista	Sí	Sí	Sí
56	Morelos -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
57	Morelos -Morelos	Sí	Sí	Sí

Tabla 15. Resultados de Pruebas de independencia de los tiempos t_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
58	Morelos –Obrera	Sí	Sí	Sí
59	Morelos -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
60	Morelos -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
61	Morelos -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
62	Morelos -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
63	Morelos -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
64	Morelos - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
65	Morelos -Balbuena	Sí	Sí	Sí
66	Obrera - Zócalo	Sí	Sí	Sí
67	Obrera -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
68	Obrera -Buenavista	Sí	Sí	Sí
69	Obrera -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
70	Obrera-Morelos	Sí	Sí	Sí
71	Obrera –Obrera	Sí	Sí	Sí
72	Obrera -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
73	Obrera -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
74	Obrera -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
75	Obrera -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
76	Obrera -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
77	Obrera - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
78	Obrera -Balbuena	Sí	Sí	Sí
79	Anáhuac- Zócalo	Sí	Sí	Sí
80	Anáhuac -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
81	Anáhuac -Buenavista	Sí	Sí	Sí
82	Anáhuac -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
83	Anáhuac -Morelos	Sí	Sí	Sí
84	Anáhuac -Obrera	Sí	Sí	Sí
85	Anáhuac -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
86	Anáhuac -Eduardo Molina	Sí	No	Sí
87	Anáhuac -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
88	Anáhuac -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
89	Anáhuac -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
90	Anáhuac - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
91	Anáhuac -Balbuena	Sí	Sí	Sí
92	Eduardo Molina - Zócalo	Sí	Sí	Sí

Tabla 16. Resultados de Pruebas de independencia de los tiempos t_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
93	Eduardo Molina -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
94	Eduardo Molina –Buenavista	Sí	Sí	Sí
95	Eduardo Molina –Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
96	Eduardo Molina-Morelos	Sí	Sí	Sí
97	Eduardo Molina –Obrera	Sí	Sí	Sí
98	Eduardo Molina –Anáhuac	Sí	Sí	Sí
99	Eduardo Molina -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
100	Eduardo Molina -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
101	Eduardo Molina –Moctezuma	Sí	Sí	Sí
102	Eduardo Molina –Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
103	Eduardo Molina – Pantitlán	Sí	Sí	Sí
104	Eduardo Molina –Balbuena	Sí	Sí	Sí
105	Romero Rubio – Zócalo	Sí	Sí	Sí
106	Romero Rubio -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
107	Romero Rubio –Buenavista	Sí	Sí	Sí
108	Romero Rubio –Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
109	Romero Rubio-Morelos	Sí	Sí	Sí
110	Romero Rubio –Obrera	Sí	Sí	Sí
111	Romero Rubio –Anáhuac	Sí	Sí	Sí
112	Romero Rubio -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
113	Romero Rubio -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
114	Romero Rubio –Moctezuma	Sí	Sí	Sí
115	Romero Rubio –Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
116	Romero Rubio – Pantitlán	Sí	Sí	Sí
117	Romero Rubio –Balbuena	Sí	Sí	Sí
118	Moctezuma – Zócalo	Sí	Sí	Sí
119	Moctezuma -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
120	Moctezuma –Buenavista	Sí	Sí	Sí
121	Moctezuma –Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
122	Moctezuma-Morelos	Sí	Sí	Sí
123	Moctezuma –Obrera	Sí	Sí	Sí
124	Moctezuma –Anáhuac	Sí	Sí	Sí
125	Moctezuma -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
126	Moctezuma -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí

Tabla 17. Resultados de Pruebas de independencia de los tiempos t_{ij}

Número	Ruta origen-destino	Dispersión y auto correlación	Prueba de corridas	Resultado final
127	Moctezuma -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
128	Moctezuma -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
129	Moctezuma - Pantalán	Sí	Sí	Sí
130	Moctezuma -Balbuena	Sí	Sí	Sí
131	Pantitlán - Zócalo	Sí	Sí	Sí
132	Pantitlán -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
133	Pantitlán -Buenavista	Sí	Sí	Sí
134	Pantitlán -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
135	Pantitlán-Morelos	Sí	Sí	Sí
136	Pantitlán –Obrera	Sí	Sí	Sí
137	Pantitlán -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
138	Pantitlán -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
139	Pantitlán -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
140	Pantitlán -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
141	Pantitlán -Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
142	Pantitlán - Pantitlán	Sí	Sí	Sí
143	Pantitlán -Balbuena	Sí	Sí	Sí
144	Balbuena - Zócalo	Sí	Sí	Sí
145	Balbuena -Zona Rosa	Sí	Sí	Sí
146	Balbuena -Buenavista	Sí	Sí	Sí
147	Balbuena -Tlatelolco	Sí	Sí	Sí
148	Balbuena -Morelos	Sí	Sí	Sí
149	Balbuena –Obrera	Sí	Sí	Sí
150	Balbuena -Anáhuac	Sí	Sí	Sí
151	Balbuena -Eduardo Molina	Sí	Sí	Sí
152	Balbuena -Romero Rubio	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena -Moctezuma	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena –Aeropuerto	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena – Pantitlán	Sí	Sí	Sí
153	Balbuena –Balbuena	Sí	Sí	Sí

Tabla 18. Resultados de Pruebas de independencia de los tiempos t_{ij}

A continuación se muestran las ventanas de Stat Fit para hacer las pruebas para los tiempos t_{ij} en el distrito Zócalo:

Distrito 1 Zócalo

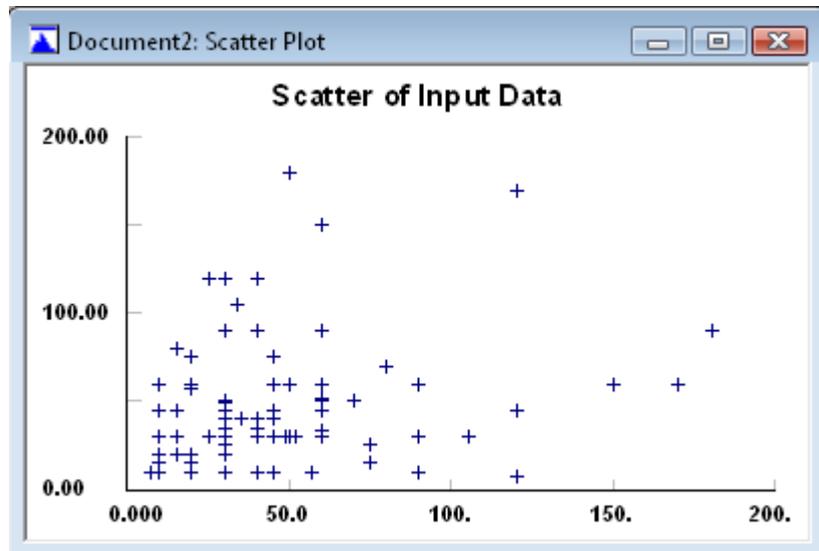


Figura 29. Diagrama de dispersión de tiempos en distrito 1

Muestra la no correlación de los costos

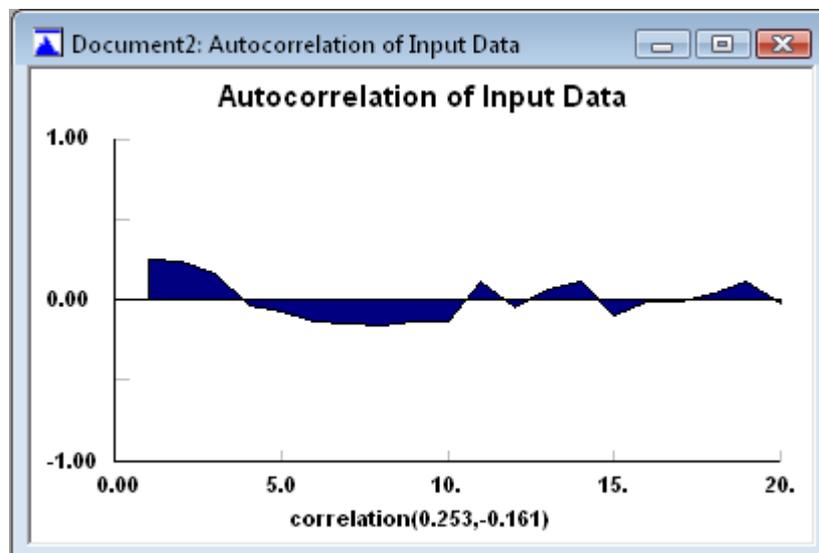


Figura 30. Gráfico de autocorrelación de tiempos en distrito 1

Muestra la no correlación de los costos

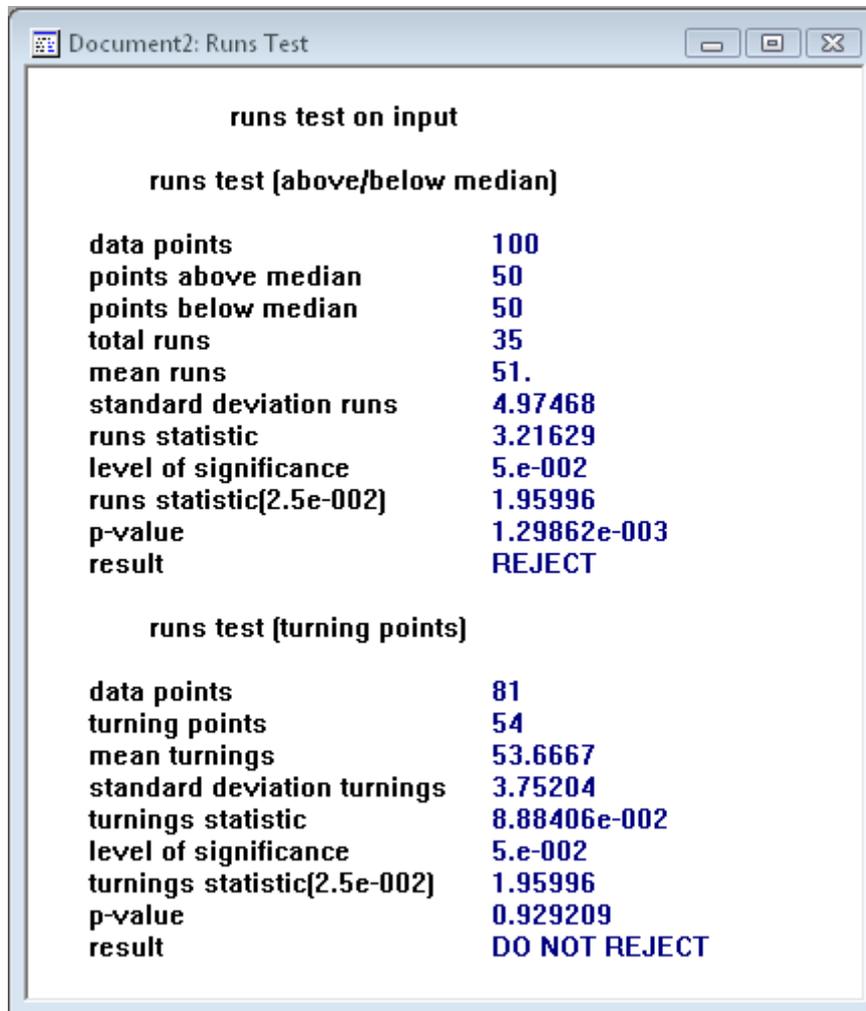


Figura 31. Gráfico de pruebas de corridas de tiempos en distrito 1

El nivel de significancia es muy pequeño

3.2.2. Pruebas de bondad de ajuste de los datos c_{ij} y t_{ij}

Una vez que se ha probado la independencia de los tiempos y costos (c_{ij}, t_{ij}) , ahora pueden convertirse a una forma conveniente para su uso en la simulación del modelo, seleccionando una distribución teórica que mejor se ajuste a los datos.

Para ello se utilizará la prueba de bondad de ajuste “Kolmogorov Smirnov y Anderson Darling” nuevamente en el programa “Best-Fit”, con lo que se tiene:

TIEMPO						
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
1	1	InvGauss	37.4321	2	3	2
1	2	Gamma	28.0226277	2	1	4
1	3	Pearson5	38.80539972	8	2	1
1	4	Lognorm	34.7501	1	1	4
1	5	ExtValue	28.97988144	1	6	1
1	6	Lognorm	27.1846	3	1	1
1	12	Lognorm	34.783	4	4	2
1	29	LogLogist	35.73922871	5	1	3
1	30	LogLogist	43.17752362	2	1	2
1	31	Weibull1	40.00896317	5	1	1
1	33	ExtValue	53.5592804	9	1	2
1	34	ExtValue	34.27693469	4	1	1
2	1	LogLogist	31.12454281	5	1	1
2	2	InvGauss	38.2244	4	1	1
2	3	Pearson5	28.89048633	2	1	1
2	4	LogLogist	48.2248259	4	2	1
2	5	ExtValue	35.93560964	7	2	2
2	6	InvGauss	33.2444	2	1	2
2	12	Pearson5	27.31317611	2	1	4
2	29	LogLogist	39.95014739	8	1	2
2	30	BetaGener	44.42115178	7	1	1
2	31	ExtValue	48.90573155	3	4	1
2	33	LogLogist	64.8042616	5	1	1
2	34	LogLogist	50.71195193	4	1	2
3	1	Lognorm	28.9264	2	3	4
3	2	InvGauss	23.9503	6	2	1
3	3	LogLogist	39.22731314	5	4	1
3	4	Pearson5	22.04088533	7	2	3
3	5	Logistic	27.4233	3	1	2
3	6	InvGauss	37.5671	5	2	2
3	12	Lognorm	26.7639	3	2	2
3	29	ExtValue	31.12052162	5	1	1
3	30	Weibull1	39.04407914	3	3	2
3	31	Normal	36.231	5	2	2
3	33	Lognorm	46.534	3	2	3
3	34	ExtValue	43.63966821	3	3	5
4	1	ExtValue	37.33650947	6	2	1
4	2	Logistic	25.9039	3	1	1
4	3	LogLogist	21.0811129	5	3	2
4	4	Pearson5	42.16371091	3	3	3
4	5	InvGauss	32.2262	6	1	2
4	6	ExtValue	34.55721873	2	1	1
4	12	Normal	54.129	3	2	1

Tabla 19. Ajuste de datos t_{ij}

TIEMPO						
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
4	29	LogLogist	27.16588339	2	1	1
4	30	Logistic	23.7583	5	1	1
4	31	30	30	.	.	.
4	33	Normal	66.7663	3	2	2
4	34	Logistic	51.754	4	2	2
5	1	Logistic	28.0641	5	3	1
5	2	Logistic	28.9296	4	1	1
5	3	LogLogist	28.78097108	9	3	4
5	4	LogLogist	29.72339726	8	3	3
5	5	Pearson5	45.17953145	2	3	3
5	6	Gamma	34.329649	3	6	1
5	12	Logistic	24.6235	6	1	2
5	29	InvGauss	24.7839	4	2	2
5	30	LogLogist	34.80170171	8	1	1
5	31	InvGauss	45.5373	3	3	2
5	33	ExtValue	46.15400754	5	3	1
5	34	Normal	44.648	8	2	2
6	1	LogLogist	18.5038345	9	1	1
6	2	Uniform	63.9978	5	3	3
6	3	ExtValue	28.9698543	2	1	2
6	4	LogLogist	37.17526794	1	1	3
6	5	InvGauss	38.635	5	2	2
6	6	BetaGener	39.19336428	8	2	2
6	12	30	30			
6	29	InvGauss	24.033	6	1	1
6	30	InvGauss	41.842	5	2	2
6	31	ExtValue	54.6021393	2	2	1
6	33	ExtValue	60.9835166	9	1	4
6	34	ExtValue	22.13694785	2	1	1
12	1	ExtValue	64.08437221	4	1	1
12	2	LogLogist	28.53365675	5	1	1
12	3	InvGauss	37.9147	2	2	3
12	4	InvGauss	34.56	6	4	1
12	5	LogLogist	43.11761288	10	1	1
12	6	Logistic	41.4681	4	1	1
12	12	Lognorm	38.359	4	2	2
12	29	Logistic	52.447	4	1	1
12	30	ExtValue	56.26576711	4	2	5
12	31	ExtValue	57.46501251	4	1	2
12	33	InvGauss	64.1216	6	2	3
12	34	Logistic	53.021	4	1	1
29	1	ExtValue	17.7046727	5	2	1
29	2	Logistic	45.2026	4	1	1

Tabla 20. Ajuste de datos t_{ij}

TIEMPO						
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
29	3	ExtValue	34.31834871	5	1	1
29	4	ExtValue	21.20770499	5	1	2
29	5	InvGauss	17.85	2	2	6
29	6	Logistic	38.585	4	1	1
29	12	-	-			
29	29	Gamma	42.1853473	3	2	1
29	30	LogLogist	18.70220025	8	1	1
29	31	LogLogist	28.92280477	5	5	7
29	33	Logistic	51.182	4	1	2
29	34	LogLogist	35.7061895	10	1	2
30	1	10	10			
30	2	-	-			
30	3	15	15			
30	4	Logistic	25.2303	4	1	1
30	5	Logistic	24.608	4	1	1
30	6	45	45			
30	12	-	-			
30	29	InvGauss	17.0858	4	2	3
30	30	3	3	2	1	1
30	31	Weibull	21.96784782	4	5	7
30	33	Logistic	33.6016	6	1	1
30	34	30	30			
31	1	Logistic	29.7738	2	1	1
31	2	35	35			
31	3	ExtValue	47.57342002	4	3	3
31	4	60	60			
31	5	Logistic	24.609	5	1	1
31	6	Logistic	34.929	4	1	1
31	12	Logistic	46.4161	6	1	1
31	29	InvGauss	32.8159	3	1	3
31	30	InvGauss	24.77256	9	2	1
31	31	InvGauss	42.2939	4	2	3
31	33	Weibull	32.0560084	6	1	1
31	34	Logistic	30.583	4	3	4
33	1	ExtValue	36.75132398	7	2	1
33	2	90	90			
33	3	60	60			
33	4	Logistic	23.1381	5	1	1
33	5	35	35			
33	6	Logistic	46.9772	5	1	1
33	12	Logistic	43.9828	6	1	1
33	29	Logistic	27.1143	4	4	3
33	30	InvGauss	31.48	5	3	3

Tabla 21. Ajuste de datos t_{ij}

TIEMPO						
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
33	31	ExtValue	33.61507406	5	5	6
33	33	Gamma	47.710312	4	3	5
33	34	Logistic	20.8803	4	2	1
34	1	ExtValue	17.85803354	6	2	3
34	2	20	20			
34	3	45	45			
34	4	InvGauss	36.0987	4	1	3
34	5	Normal	29.708	4	3	3
34	6	InvGauss	31.9766	7	3	3
34	12	ExtValue	53.52701029	5	2	3
34	29	Logistic	23.5312	7	3	5
34	30	ExtValue	29.6683242	5	1	1
34	31	Logistic	26.1384	6	1	1
34	33	ExtValue	46.01785802	2	5	7
34	34	Gamma	42.4718879	4	3	3

Tabla 22. Ajuste de datos t_{ij}

La tabla 23 muestra las distribuciones ajustadas para los costos:

Ruta		Costo				
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
1	1	Pearson5	3.36945554	4	1	4
1	2	Pearson5	8.770760972	5	1	1
1	3	Logistic	10.194	6	1	1
1	4	ExtValue	4.110183194	5	1	1
1	5	Normal	3.291	5	1	1
1	6	Expon	5.6537776	4	1	1
1	12	Logistic	3.02325	4	2	1
1	29	ExtValue	6.510659748	5	3	1
1	30	Pearson5	6.683846623	4	1	1
1	31	ExtValue	2.64926462	4	1	1
1	33	Logistic	3.08799	4	1	1
1	34	Logistic	4.0656	5	1	2
2	1	InvGauss	8.8317	3	2	3
2	2	Lognorm	10.8926024	4	1	2
2	3	Normal	6.9281	5	1	2
2	4	InvGauss	5.249	1	1	3
2	5	Logistic	3.6358	5	1	1
2	6	Lognorm	6.069828	6	2	3

Tabla 23. Ajuste de datos c_{ij}

Ruta		Costo				
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
2	12	Expon	10.0456757	1	3	3
2	29	Logistic	5.7973	6	1	1
2	30	Lognorm	6.9477	2	1	2
2	31	LogLogist	4.138329359	3	2	1
2	33	Normal	2.62398	4	1	2
2	34	LogLogist	3.773817328	2	1	1
3	1	Logistic	13.8818	8	1	3
3	2	Logistic	7.8292	4	1	1
3	3	InvGauss	7.6022	1	2	4
3	4	InvGauss	7.83567	3	1	2
3	5	InvGauss	6.2452	4	2	3
3	6	Logistic	14.4214	5	1	1
3	12	Lognorm	8.478826	1	4	4
3	29	Normal	8.1157	4	2	2
3	30	Logistic	4.4552	6	1	1
3	31	Logistic	3.33804	5	1	1
3	33	ExtValue	3.274098253	4	1	2
3	34	Logistic	31.9581	6	1	3
4	1	Logistic	21.997	3	1	1
4	2	Logistic	2.72085	6	1	1
4	3	ExtValue	6.875001945	5	3	3
4	4	InvGauss	10.318951	1	2	3
4	5	Normal	2.9283	4	1	2
4	6	ExtValue	5.285677953	6	3	3
4	12	Logistic	21.28	6	3	1
4	29	Logistic	7.9484	3	4	6
4	30	Logistic	12.446	6	1	1
4	31	3.5	3.5			
4	33	5	5			
4	34	ExtValue	2.987468287	5	2	3
5	1	Normal	8.468	4	2	1
5	2	Logistic	4.0274	6	1	1
5	3	Normal	2.73318	5	1	2
5	4	Logistic	4.0518	5	1	1
5	5	InvGauss	13.382659	1	2	3
5	6	Normal	13.947	5	2	2
5	12	Expon	3.8473	4	4	4
5	29	Pearson5	8.551991299	2	1	4
5	30	Logistic	5.5661	4	1	1
5	31	InvGauss	6.9621	6	2	2
5	33	ExtValue	12.99206517	5	2	4
5	34	Normal	8.9432	5	1	3
6	1	Logistic	4.8163	4	1	1
6	2	Normal	4.939	7	1	2
6	3	0	0			
6	4	Logistic	3.8823	5	1	2

Tabla 24. Ajuste de datos c_{ij}

Ruta		Costo				
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
6	5	0	0			
6	6	Lognorm	8.3407357	4	1	2
6	12	Expon	18.911174	2	2	5
6	29	Logistic	3.5142	7	2	2
6	30	Lognorm	7.783591	1	2	3
6	31	Lognorm	10.059645	3	2	3
6	33	Logistic	23.705	5	2	1
6	34	Logistic	2.71971	4	2	1
12	1	2.5	2.5			
12	2	Logistic	6.6569	5	1	1
12	3	Normal	3.3561	5	3	1
12	4	Normal	6.5081	4	3	2
12	5	Logistic	3.17017	4	1	1
12	6	Logistic	4.8023	5	1	1
12	12	Lognorm	6.5104994	4	1	2
12	29	Lognorm	23.117014	1	3	2
12	30	Normal	3.15385	4	2	2
12	31	2.5	2.5			
12	33	ExtValue	7.041980873	4	3	3
12	34	ExtValue	10.38483193	8	2	1
29	1	Logistic	14.5176	6	1	1
29	2	50	50			
29	3	2.5	2.5			
29	4	Logistic	4.9017	7	1	1
29	5	Logistic	6.1859	4	1	1
29	6	30	30			
29	12	-	-			
29	29	InvGauss	8.059791	1	2	3
29	30	Lognorm	4.1066	6	2	2
29	31	3.5	3.5			
29	33	18.5	18.5			
29	34	LogLogist	8.457338382	9	1	1
30	1	24	24			
30	2	-	-			
30	3	-	-			
30	4	Logistic	3.3986	5	2	1
30	5	Logistic	12.7118	6	1	1
30	6	-	-			
30	12	-	-			
30	29	Logistic	2.518995	4	2	1
30	30	InvGauss	7.767484	1	2	3
30	31	Logistic	3.2583	5	1	2
30	33	Logistic	2.92719	6	1	1
30	34	-	-			
31	1	ExtValue	32.38932338	4	1	2
31	2	-	-			

Tabla 25. Ajuste de datos c_{ij}

Ruta		Costo				
Origen	Destino	Distribución	Media	Chi-Squ	A-D	K-S
31	3	2.5	2.5			
31	4	2.5	2.5			
31	5	Logistic	14.9061	6	1	1
31	6	Logistic	38	5	1	1
31	12	2.5	2.5			
31	29	Logistic	5.2	6	1	1
31	30	Lognorm	5.648611	4	3	1
31	31	InvGauss	6.870571	4	2	3
31	33	Logistic	7.1335	6	1	2
31	34	Logistic	9.8974	6	1	1
33	1	Logistic	5.9212	4	2	1
33	2	-	-			
33	3	2	2			
33	4	2.5	2.5			
33	5	-	-			
33	6	Normal	3.57885	5	3	3
33	12	2.5	2.5			
33	29	Logistic	24.9694	5	1	1
33	30	Logistic	6.1649	4	1	1
33	31	Logistic	4.373	7	1	1
33	33	InvGauss	7.813094	2	2	4
33	34	Pearson	5.388239105	4	2	1
34	1	Logistic	8.5498	6	1	1
34	2	-	-			
34	3	30	30			
34	4	Logistic	8.1043	6	1	1
34	5	Normal	5.9888	4	1	2
34	6	ExtValue	4.60456828	2	3	5
34	12	-	-			
34	29	ExtValue	6.951361914	5	3	3
34	30	InvGauss	7.375	1	1	2
34	31	Lognorm	6.8934	4	1	1
34	33	Logistic	4.7815	4	1	4
34	34	Expon	7.42277834	4	2	4

Tabla 26. Ajuste de datos c_{ij}

Las rutas que sólo presentan un número serán tomados en cuenta para el modelo con una distribución normal con media “X” correspondiente al valor del número registrado en la tabla. Por ejemplo para el ajuste del costo con la ruta del distrito 34 al 3 en la tabla 26 se tendrá una distribución normal con media 30. Puesto que la teoría de los grandes números dice que los fenómenos naturales se ajustan a la Normal por default. Asimismo los datos que registran cero se tomaran en cuenta como tal.

3.3. Planteamiento del escenario y simulación

Con el objeto de fomentar y facilitar el uso del transporte de infraestructura se propone reducir su tarifa en un 15% y aumentar el costo de utilización del transporte individual en un 30%. De esta manera se supone que los viajeros utilizarán más a menudo el transporte público como el metro, metro-bus y/o trolebús, buscando reducir la congestión o tráfico de automóviles en la Zona Metropolitana del Valle de México, subsidiando más el transporte público y con los beneficios de una reducción en el impacto ambiental de los vehículos.

Es necesario mostrar el modelo de la caja negra para la simulación del escenario propuesta:



Figura 32. Modelo de la caja negra

3.3.1. Escenario a simular: “Línea 4 del metrobús en la Ciudad de México”

El metrobús es un modo de transporte BRT (Bus Rapid Transit) que combina estaciones, vehículos y tecnología. Como se sabe, comenzó a operar el 19 de junio del 2005 sobre la avenida de los Insurgentes, con el fin de brindar un transporte más eficiente para los habitantes de la Ciudad de México el 13 de marzo del 2008 se inauguró la ampliación sur de la línea uno.

La red del metrobús tiene tres líneas operando actualmente, en ésta tesis se analizará la línea 4 de metrobús que se está terminando de construir y que será inaugurada el próximo enero del 2012, tendrá 27.3 km de extensión y cruzará las delegaciones:

Funcionarán como terminales: Buenavista, San Lázaro y las Terminales 1 y 2 del Aeropuerto.

Esta nueva ruta beneficiará a casi a 12 millones de personas al año, se contará con transbordo directo con las Líneas 1 y 3 del Metrobús, y tendrá correspondencia con el Sistema de Transporte Colectivo Metro, en las líneas B, 1, 4 y 8, así como con el Tren Suburbano y corredores Cero Emisiones.

Además de que contará con servicio expreso a las terminales 1 y 2 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, los vehículos que se incorporarán serán diseñados con espacios para equipaje.

Con el modelo presentado en ésta tesis se busca conocer si el metrobús ha cumplido su propósito, haciendo la simulación los distintos viajes variando los costos y tiempos de traslado desde "i" hasta "j".

Los distritos involucrados se muestran a continuación (ver figura 33):

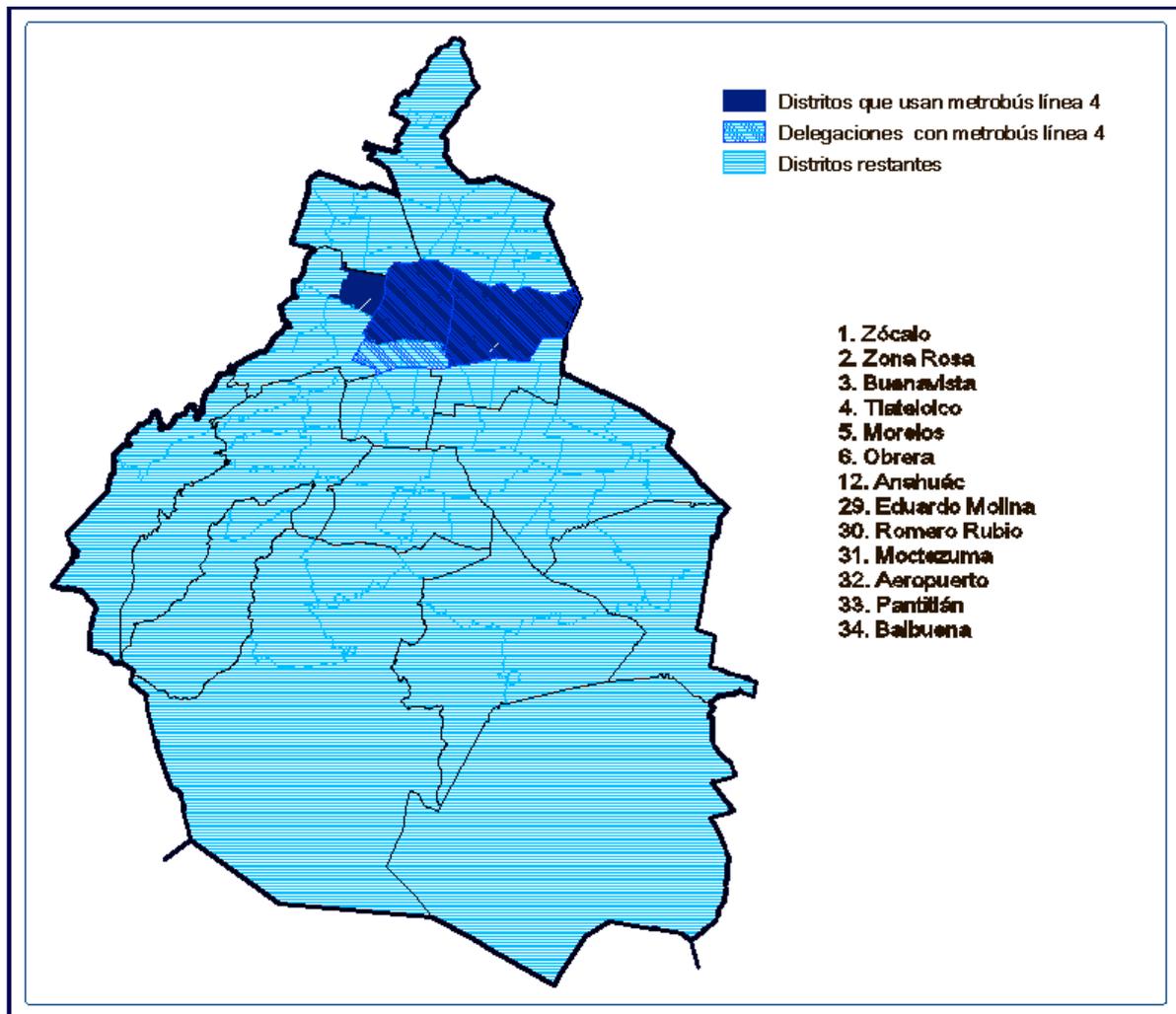


Figura 33. Distritos que cuentan con la línea 4 del metrobús.



Figura 35. Diagrama de simulación

El costo y tiempo son introducidos con sus respectivas distribuciones

Se realizó una simulación usando el método de Montecarlo con muestreos de números aleatorios en una computadora. El resultado de simulación es una muestra de un rango completo de demandas posibles, incluyendo las probabilidades de que éstas ocurran al probar el escenario. Como se muestra en la siguiente gráfica.

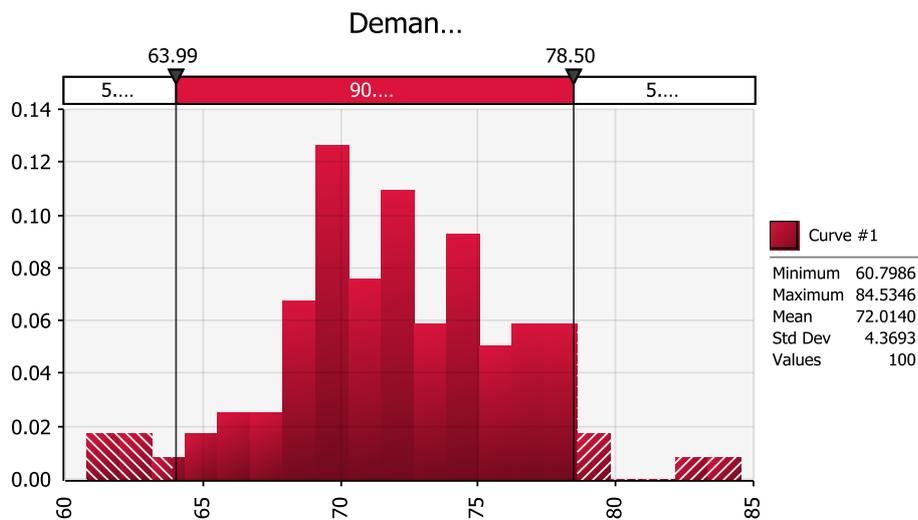


Figura 36. Gráfica de simulación de demanda con @Risk

Se generan por default 100 corridas variando los valores de tiempo y costo dentro de las distribuciones definidas como se muestra en la siguiente imagen, con los resultados de las pruebas de bondad de ajuste en Best Fit.g

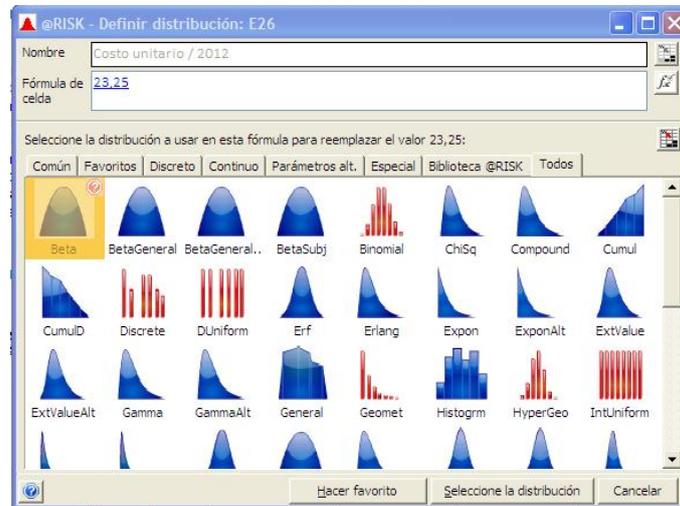


Figura 37. Entrada de los parámetros ajustados a la distribución Ext. Value-Gumbell

Se introducen los valores de costo y tiempo con sus respectivas distribuciones. Una vez definido esto, se presiona el icono “Comenzar Simulación” en la barra de herramientas de @Risk en Excel, los resultados se arrojan en un reporte generado automáticamente en un nuevo libro de Excel. Dichos resultados se enuncian en el siguiente capítulo.

Capítulo 4 Resultados, conclusiones y recomendaciones

Objetivos del capítulo

1. Analizar, resumir y comparar los resultados de la simulación para cada escenario.
2. Concluir sobre la simulación de la demanda de transporte para la línea 4 del metrobús.

4.1. Escenario base. Demanda Observada vs Demanda Simulada

Con las pruebas de corridas y la generación de distribuciones para tiempos y costos se simuló un escenario con la línea 4 del metrobús.

Se introdujeron los datos de costo c_{ij} y tiempo t_{ij} al modelo sin ser alterados (escenario actual), para una primera simulación con una distribución probabilística para cada ruta " ij ". Después, como validación del modelo podemos observar la variación existente entre la Demanda Observada por la EOD2007 y la Demanda Simulada con el modelo. Con una recolección óptima de información y un desarrollo y funcionamiento correcto del modelo, se podría esperar que ambas demandas tengan valores con poca variación.

4.1.1. Total de todos los modos

En el siguiente gráfico podemos observar la diferencia entre la Demanda Promedio obtenida mediante las corridas de simulación del modelo, la Demanda Observada y los valores máximos y mínimos de simulación obtenidos:

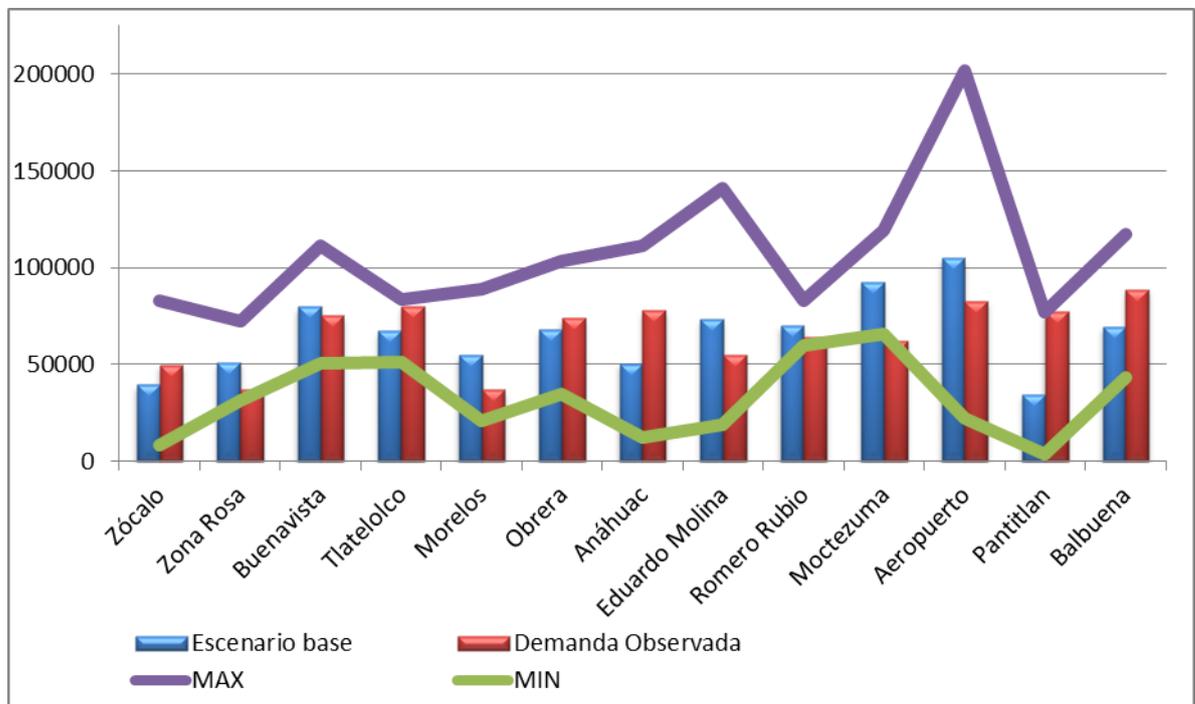


Figura 38 Gráfica de valores de demandas totales para cada distrito simulación 1

En la Figura 38 se puede observar el comportamiento de la simulación (Escenario base) con respecto a la Demanda Observada. En la siguiente tabla se muestra la comparación en forma numérica:

Distrito	Demanda Observada	Escenario base	Variación
Zócalo	49,838	39,499	-20.70%
Zona Rosa	37,194	51,124	37.50%
Buenavista	75,235	79,898	6.20%
Tlatelolco	80,232	67,206	-16.20%
Morelos	36,904	54,687	48.20%
Obrera	73,838	67,773	-8.20%
Anáhuac	77,696	50,552	-34.90%
Eduardo Molina	54,949	73,542	33.80%
Romero Rubio	64,246	70,266	9.40%
Moctezuma	62,431	92,483	48.10%
Aeropuerto	82,905	105,005	26.70%
Pantitlán	77,110	34,722	-55.00%
Balbuena	88,724	69,548	-21.60%
Total	861,302	856,305	-0.60%

Tabla 27. Comparación de demandas totales para cada distrito

Del análisis sobre la gráfica y la tabla correspondientes a las demandas totales en cada distrito, se puede observar que hay algunos casos con una variación de hasta un menos 55% en el distrito Pantitlán. La diferencia en estos casos es atribuible a errores o carencias en la metodología de muestreo para la EOD2007. Por ejemplo, para el caso de Pantitlán, hay varios Orígen-Destino con muy pocos valores obtenidos en el muestreo de costo y tiempo, por lo que la distribución ajustada no es la ideal para que la simulación arroje los resultados esperados. Para evitar estas diferencias, sería necesario asegurar un tamaño de muestra suficiente en futuras aplicaciones de Encuestas Orígen-Destino.

4.1.2. Modo Infraestructura

Para el modo infraestructura se obtuvieron los siguientes datos acerca de la demanda por distrito.

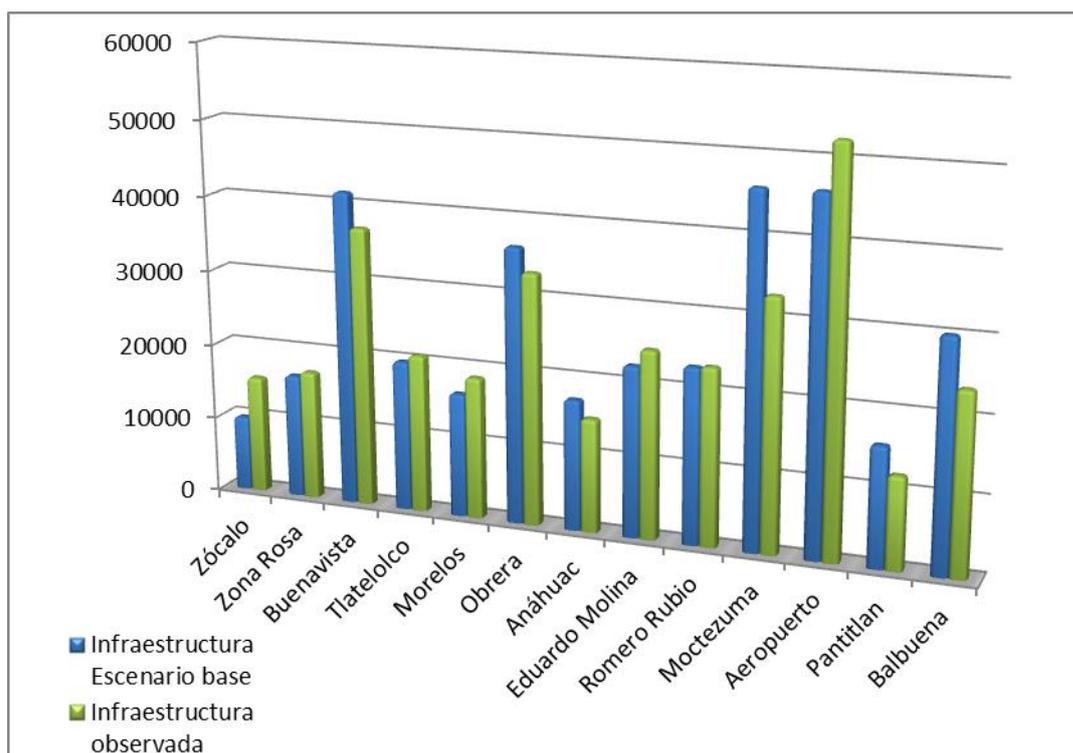


Figura 39. Gráfica comparativa entre las demandas Observada y del Escenario base para el modo “Infraestructura”}

Distrito	Infraestructura Demanda Observada	Infraestructura Escenario base simulado	Variación
Zócalo	15,567.15	9,907.33	-36.4%
Zona Rosa	17,082.07	16,397.61	-4.0%
Buenavista	37,012.68	41,530.28	12.2%
Tlatelolco	20,910.91	19,873.07	-5.0%
Morelos	18,735.50	16,382.35	-12.6%
Obrera	33,145.89	36,301.78	9.5%
Anáhuac	14,971.25	17,257.17	15.3%
Eduardo Molina	24,725.62	22,474.08	-9.1%
Romero Rubio	23,322.82	23,127.11	-0.8%
Moctezuma	32,986.04	46,033.45	39.6%
Aeropuerto	52,351.46	46,133.86	-11.9%
Pantitlán	12,167.56	15,721.77	29.2%
Balbuena	23,736.42	30,112.08	26.9%
Mínimo	12,167.56	9,907.33	-36.4%
Máximo	52,351.46	46,133.86	39.6%
Total	326,715.37	341,251.94	4%

Tabla 28. Demandas Observada y del Escenario base para el modo “Infraestructura”

Para el modo infraestructura obtenemos los resultados de la simulación sin variación en los valores de costo y tiempo con respecto a los valores observados. Los valores obtenidos varían entre un menos 36.4% (Zócalo) y un 39.6% (Moctezuma) en la demanda. Estas diferencias pueden ser atribuibles a que el modelo toma como base un comportamiento de la demanda que depende de las variables costo y tiempo, excluyendo otro tipo de criterios de decisión como comodidad, costumbre, cercanía al destino final deseado, etc.

4.1.3. Modo Individual

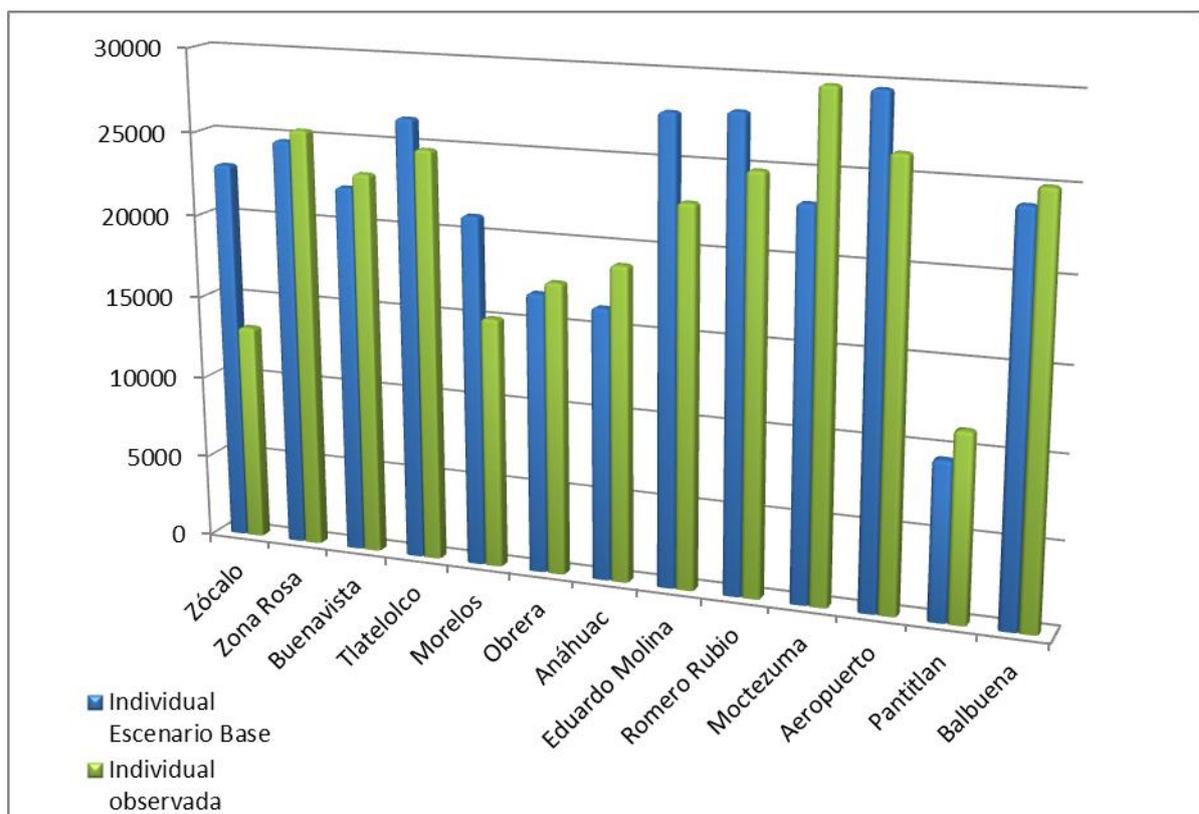


Figura 40. Gráfica comparativa entre las demandas Observada y del Escenario base para el modo “Individual”

Distrito	Individual observada	Individual simulación 1	Variación
Zócalo	13,179.85	23,065.14	75%
Zona Rosa	25,429.76	24,739.17	-3%
Buena Vista	23,094.89	22,232.13	-4%
Tlatelolco	24,777.23	26,529.01	7%
Morelos	15,122.33	21,109.67	40%
Obrera	17,591.81	16,863.71	-4%
Anáhuac	18,916.71	16,345.35	-14%
Eduardo Molina	22,777.10	27,790.27	22%
Romero Rubio	24,849.07	28,042.6	13%
Moctezuma	29,748.38	23,224.67	-22%
Aeropuerto	26,320.06	29,683.24	13%
Pantitlán	11,275.93	9,495.125	-16%
Balbuena	25,025.78	23,963.65	-4%
Mínimo	11,275.93102	9,495.125	-16%
Máximo	29,748.37552	29,683.24	0%
Total	278,108.90	293,083.74	5%

Tabla 29. Demandas Observada y del Escenario base para el modo “Individual”

Para el modo Individual, podemos observar que la mayor variación ocurre de nuevo en el distrito Zocalo, con un 75% sobre el valor observado. Se observa que las diferencias en el distrito Zócalo persisten, al depender una directamente de las otras.

4.1.4. Resto de los modos

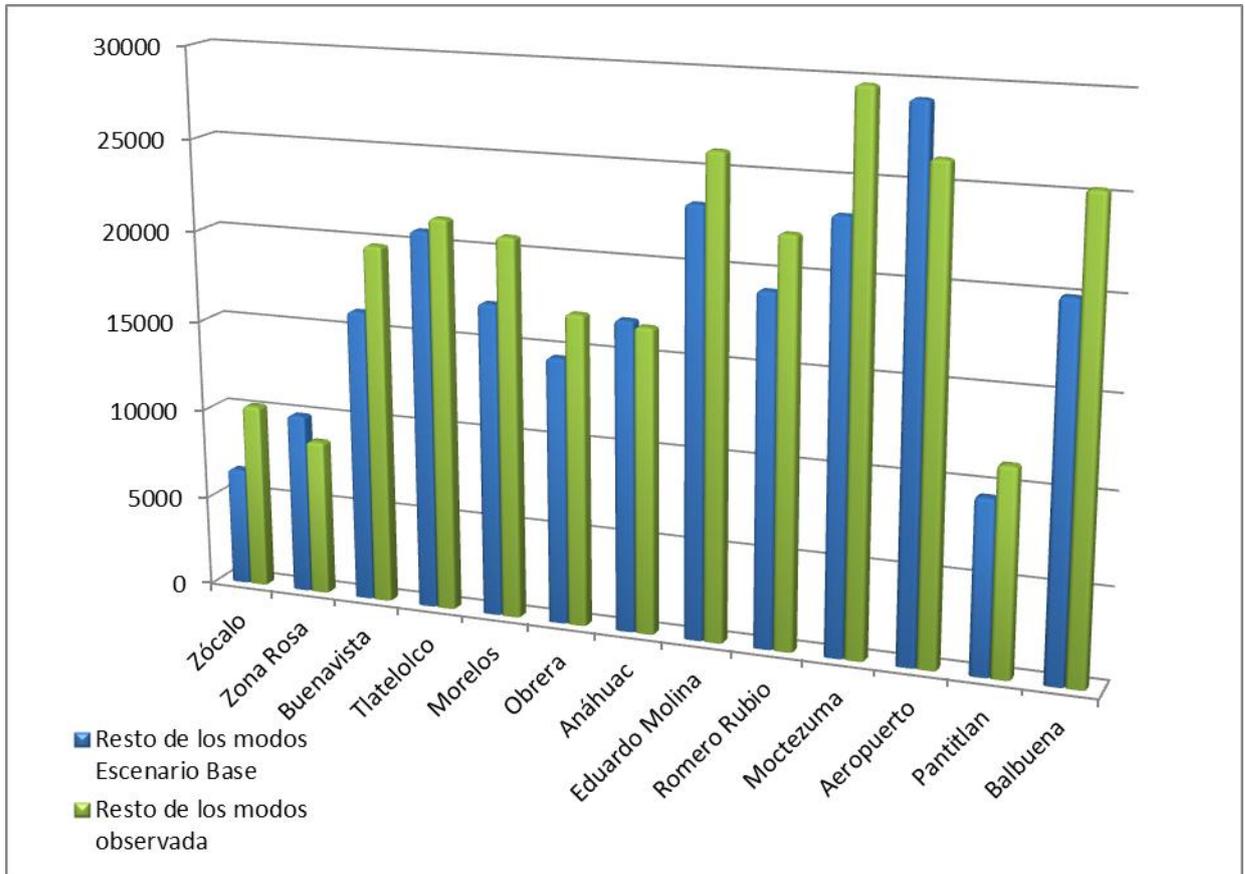


Figura 41. Gráfica comparativa entre las demandas Observada y del Escenario base para el modo "Resto de los modos"

Distrito	Resto de los modos observada	Resto de los modos Escenario Base	Variación
Zócalo	10,262.73	6,526.79	-36.4%
Zona Rosa	8,612.01	9,987.06	16.0%
Buenavista	19,790.11	16,135.27	-18.5%
Tlatelolco	21,517.81	20,803.86	-3.3%
Morelos	20,829.65	17,195.45	-17.4%
Obrera	17,034.91	14,607.13	-14.3%
Anáhuac	16,664.52	16,949.95	1.7%
Eduardo Molina	26,039.35	23,277.72	-10.6%
Romero Rubio	22,094.45	19,096.63	-13.6%
Moctezuma	29,748.38	23,224.67	-21.9%
Aeropuerto	26,333.37	29,187.80	10.8%
Pantitlán	11,278.39	9,504.98	-15.7%
Balbuena	25,339.79	20,026.27	-21.0%
Mínimo	8,612.00	65,26.787	-36.4%
Máximo	29,748.37	29,187.8	16.0%
Total	255,545.47	226,523.58	-11%

Tabla 30. Demandas Observada y del Escenario base para el modo “Resto de los modos”

Para el “Resto de los modos”, obtuvimos variaciones desde el -36% hasta un 16% sobre la demanda observada. De nuevo el distrito que presenta mayor variación es Zócalo, por lo que podemos sospechar de que sea el distrito con menor influencia por la relación costo-tiempo-demanda, causando estas diferencias contra el modelo.

4.2. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Habiendo analizado el comportamiento del modelo simulando la demanda con las mismas condiciones observadas (Demanda Observada vs. Escenario Base), se analizará el comportamiento de la demanda en el Escenario Base frente al Escenario Alternativo, evaluando así el impacto que tendría en la demanda la puesta en marcha de la Línea 4 del Metrobús según las simulaciones con el modelo.

4.2.1. Total de los modos

Del mismo modo que en el punto anterior, se analizará el comportamiento esperado de la demanda, comparando el comportamiento que ésta tendría en ambos escenarios, según el modelo de simulación auxiliándonos de las gráficas y tablas de datos resultantes.

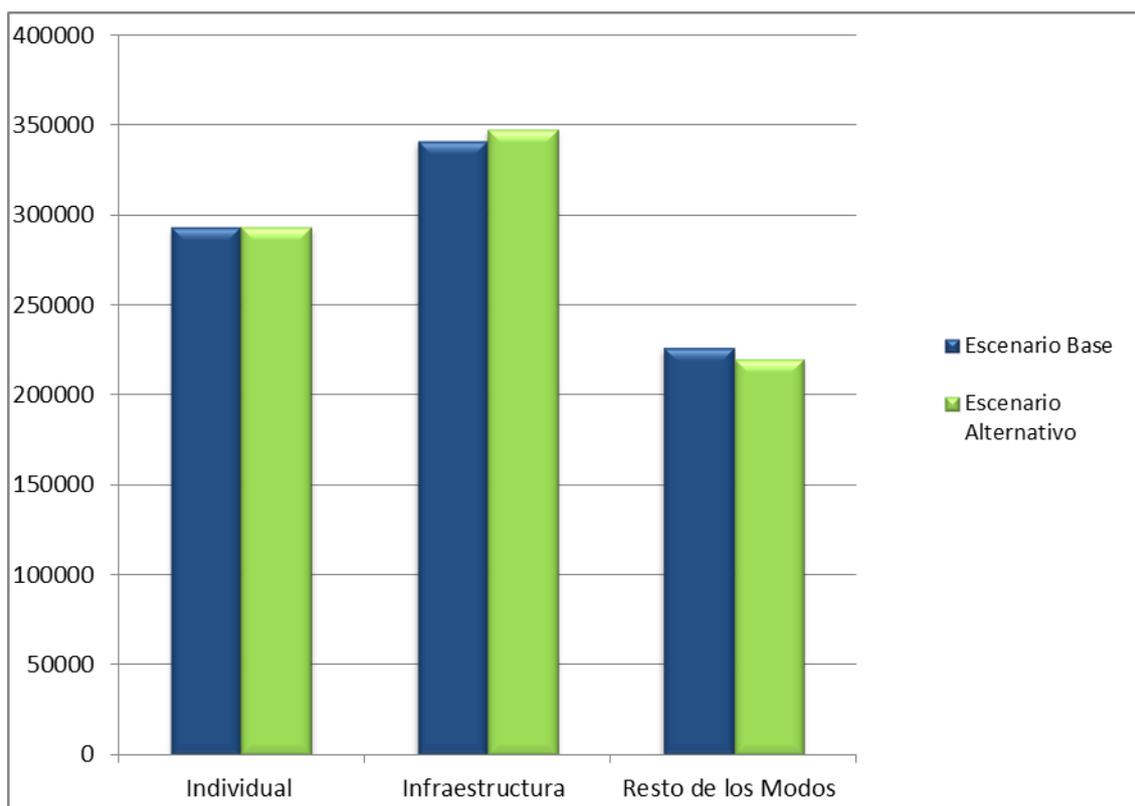


Figura 42. Gráfica de demandas. Escenario Base vs. Escenario Alternativo por modo.

	Individual	Infraestructura	Resto de los modos	Demanda Total
Escenario Base	293,083.735	341,251.94	226,523.579	860,859.254
Escenario Alternativo	293,178.127	347,358.391	220,332.906	860,869.424

Tabla 31. Demandas por Modo. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Podemos observar que la demanda del modo “Individual permanece prácticamente constante, mientras que existe aumento en la demanda del modo “Infraestructura” y decremento en “Resto de los modos”. Esto significa que la nueva línea del Metrobús estaría absorbiendo demanda sobre todo de “Resto de los modos”.

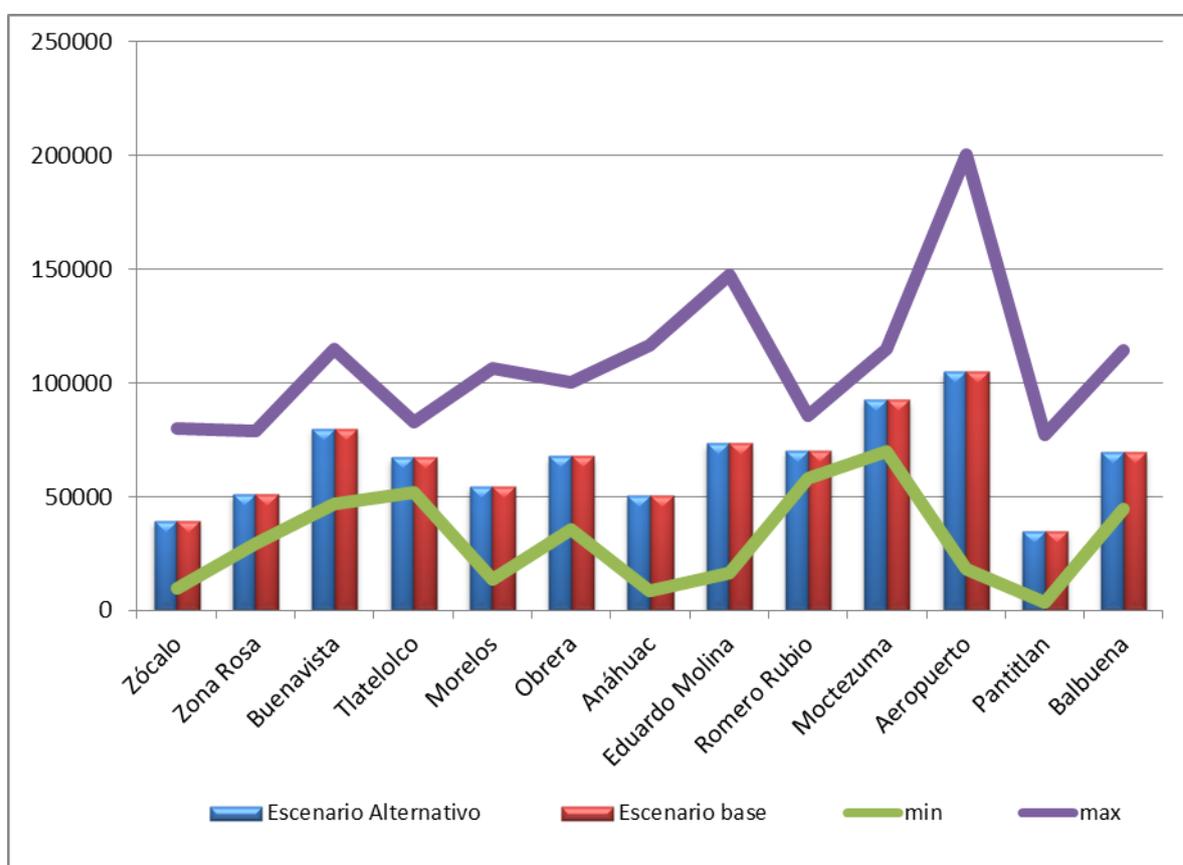


Figura 43. Gráfica de demandas por distrito. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Distrito	Escenario base	Escenario Alternativo
Zócalo	39,499.26	39,509.45
Zona Rosa	51,123.84	51,123.84
Buenavista	79,897.68	79,897.68
Tlatelolco	67,205.94	67,205.95
Morelos	54,687.47	54,687.47
Obrera	67,772.62	67,772.61
Anáhuac	50,552.47	50,552.47
Eduardo Molina	73,542.07	73,542.07
Romero Rubio	70,266.34	70,266.34
Moctezuma	92,482.79	92,482.78
Aeropuerto	105,004.90	105,004.89
Pantitlán	34,721.88	34,721.878
Balbuena	69,547.53	69,548.53
Total	856,304.79	856,315.96

Tabla 32. Demandas por Distrito. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Se puede observar que la demanda permanece constante, puesto que la demanda para cada distrito es la misma generada siempre en el modelo con la función de utilidad constante, variando posteriormente en la distribución por modo, por los coeficientes variables de costo y tiempo.

4.2.2. Modo Infraestructura

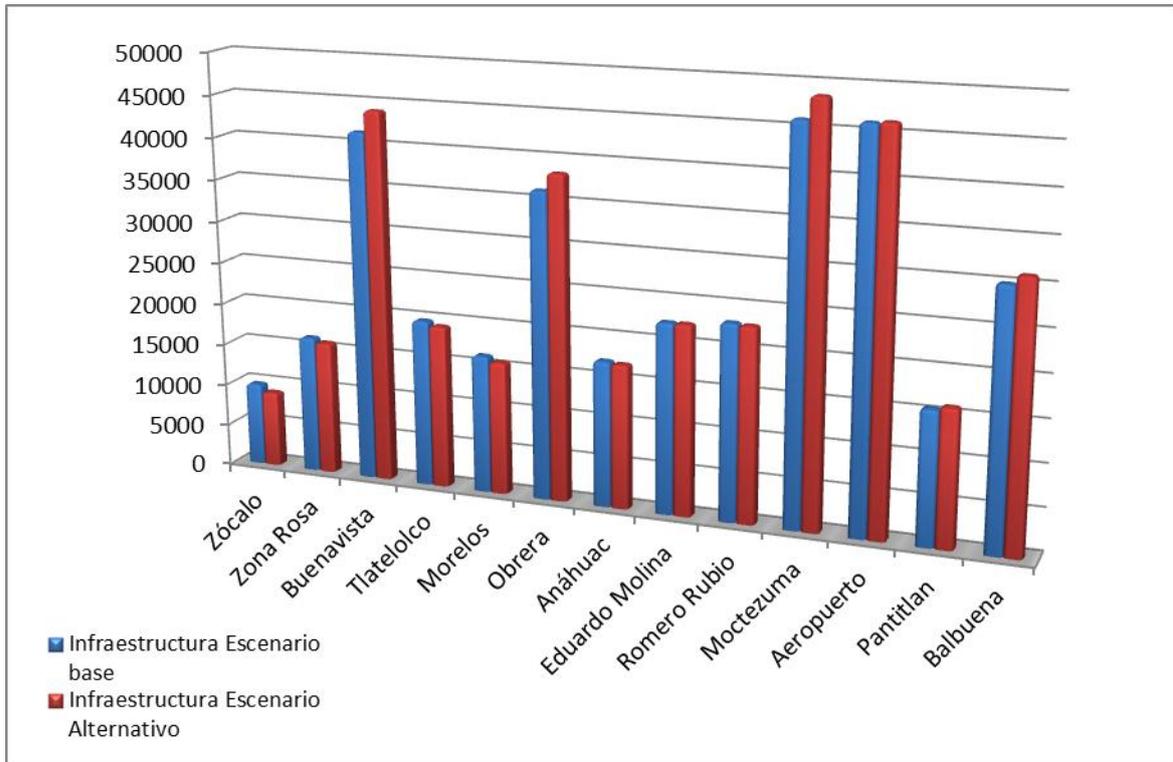


Figura 44. Gráfica de demandas por distrito para “Infraestructura”. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Distrito	Infraestructura Escenario base	Infraestructura Escenario Alternativo	Variación
Zócalo	9,907.33	9,056.36	-8.6%
Zona Rosa	16,397.61	15,948.46	-2.7%
Buenavista	41,530.28	44,100.41	6.2%
Tlatelolco	19,873.07	19,378.81	-2.5%
Morelos	16,382.35	15,800.93	-3.5%
Obrera	36,301.78	38,369.56	5.7%
Anáhuac	17,257.17	17,058.44	-1.2%
Eduardo Molina	22,474.08	22,485.71	0.1%
Romero Rubio	23,127.11	22,967.60	-0.7%
Moctezuma	46,033.45	48,618.66	5.6%
Aeropuerto	46,133.86	46,291.59	0.3%
Pantitlán	15,721.77	16,119.67	2.5%
Balbuena	30,112.08	31,162.19	3.5%
Mínimo	9,907.33	9,056.361	-8.6%
Máximo	46,133.86	48,618.66	6.2%
Total	341,251.94	347,358.39	2%

Tabla 33. Demandas para “Infraestructura”. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Podemos observar que el modo Infraestructura gana demanda en algunos distritos y la pierde en otros. Esto depende de la preferencia que se dé en el distrito a tener un menor costo o un menor tiempo de viaje. El distrito que más demanda pierde para este modo es Zócalo con un 8.6%, mientras que Buenavista gana un 6.2% de demanda.

4.2.3. Modo individual

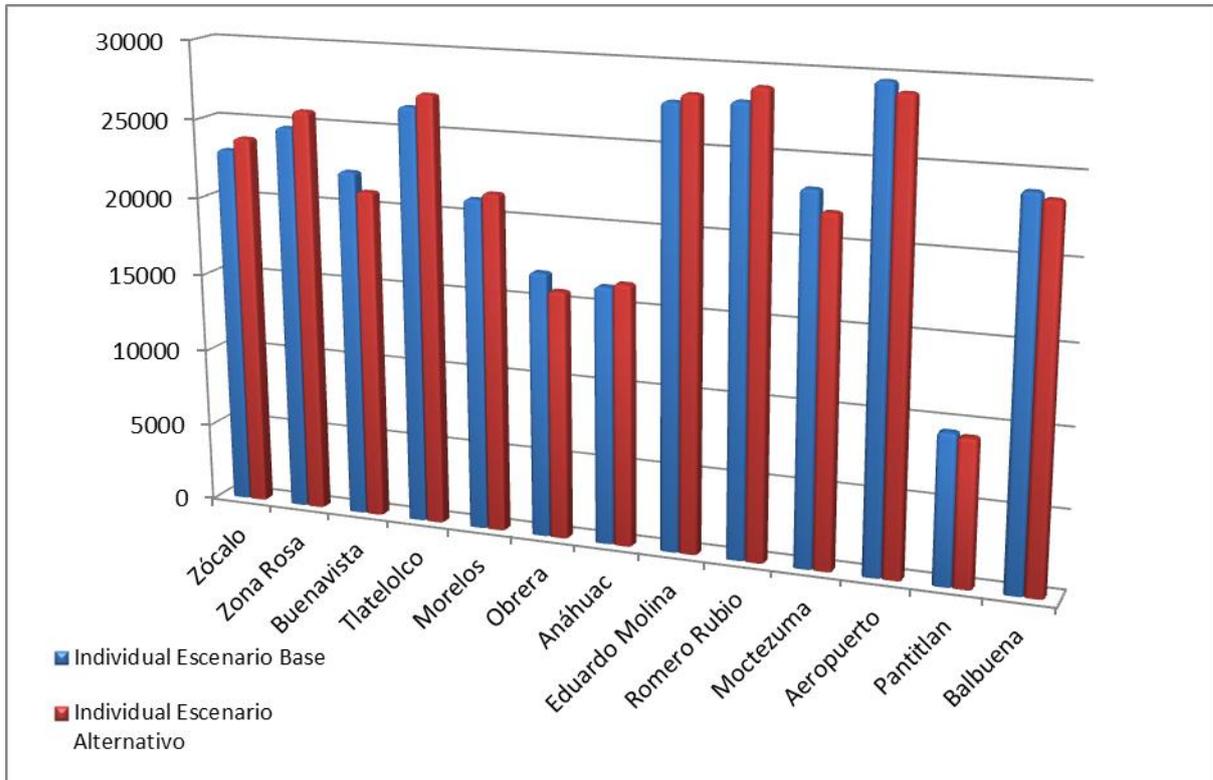


Figura 45. Gráfica de demandas por distrito para “Individual”. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Distrito	Individual Escenario Base	Individual Escenario Alternativo	Variación
Zócalo	23,065.14	23,878.64	3.5%
Zona Rosa	24,739.17	25,843.84	4.5%
Buenavista	22,232.13	21,045.23	-5.3%
Tlatelolco	26,529.01	27,356.53	3.1%
Morelos	21,109.67	21,533.31	2.0%
Obrera	16,863.71	15,790.04	-6.4%
Anáhuac	16,345.35	16,604	1.6%
Eduardo Molina	27,790.27	28,300.22	1.8%
Romero Rubio	28,042.60	28,938.65	3.2%
Moctezuma	23,224.67	21,932.06	-5.6%
Aeropuerto	29,683.24	29,072.12	-2.1%
Pantitlán	9,495.13	9,300.707	-2.0%
Balbuena	23,963.65	23,582.78	-1.6%
Mínimo	9,495.125	9,300.707	-6.4%
Máximo	29,683.24	29,072.12	4.5%
Total	293,083.74	293,178.13	0%

Tabla 34. Demandas para “Individual”. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Para el modo Individual, que es el que menos varía en su demanda total, es posible observar sus variaciones a nivel distrito. Las mayores variaciones son para el distrito Obrera, donde pierde el 6.4% de su demanda y para Zona Rosa, donde incrementa en 4.5%.

4.2.4. Resto de los modos

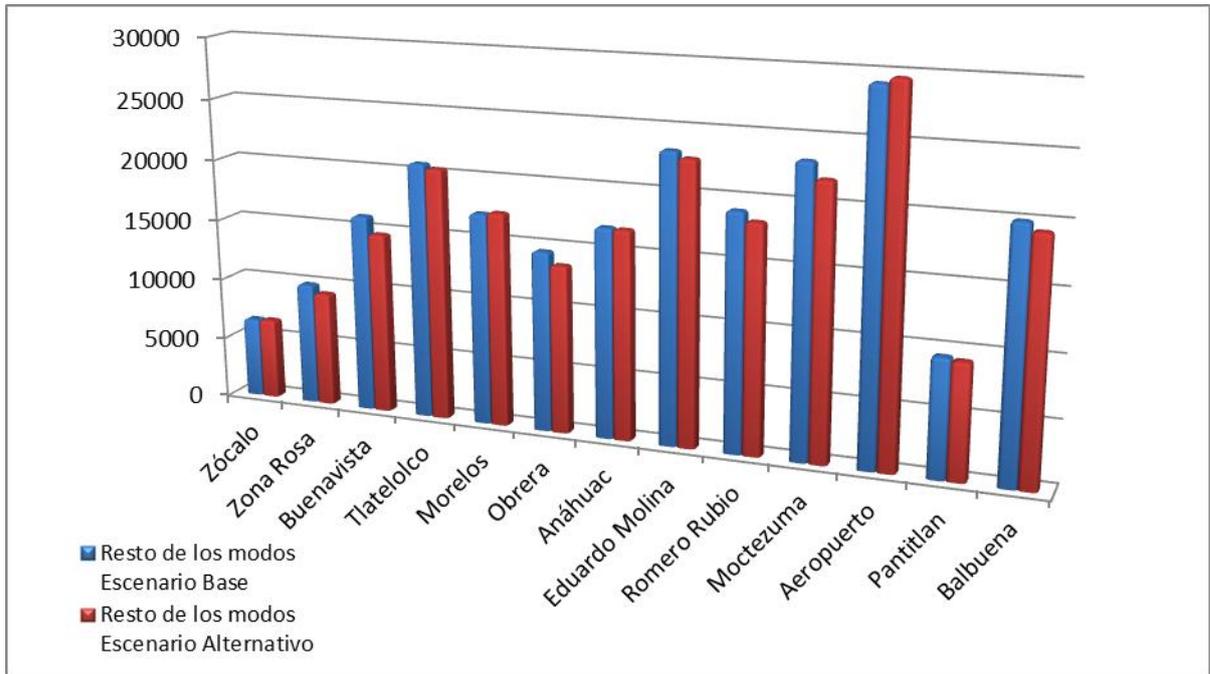


Figura 46. Gráfica de demandas por distrito para “Resto de los modos”. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Distrito	Resto de los modos Escenario Base	Resto de los modos Escenario Alternativo	Variación
Zócalo	6,526.79	6,574.45	0.7%
Zona Rosa	9,987.06	9,331.54	-6.6%
Buenavista	16,135.27	14,752.04	-8.6%
Tlatelolco	20,803.86	20,470.61	-1.6%
Morelos	17,195.45	17,353.23	0.9%
Obrera	14,607.13	13,613.01	-6.8%
Anáhuac	16,949.95	16,890.03	-0.4%
Eduardo Molina	23,277.72	22,756.14	-2.2%
Romero Rubio	19,096.63	18,360.09	-3.9%
Moctezuma	23,224.67	21,932.06	-5.6%
Aeropuerto	29,187.80	29,641.18	1.6%
Pantitlán	9,504.98	9,301.50	-2.1%
Balbuena	20,026.27	19,357.03	-3.3%
Mínimo	6,526.787	6,574.449	-8.6%
Máximo	29,187.8	29,641.18	1.6%
Total	226,523.58	220,332.91	-3%

Tabla 35. Demandas para “Resto de los modos”. Escenario Base vs. Escenario Alternativo.

Para Resto de los modos, se puede observar que la mayor variación es la pérdida del 8.6% de la demanda en Buenavista y el incremento de 1.6% en Aeropuerto. La mayor parte de los distritos pierden demanda. Esto concuerda con las demandas totales por modo, donde se observa una pérdida para Resto de los modos y un correspondiente incremento para Infraestructura.

4.3. Resumen

Del análisis de los resultados obtenidos para el Escenario Base, al compararlos con los datos observados, podemos concluir lo siguiente:

- La demanda total resultante en el modelo por distrito es similar a la observada en la mayoría de los casos. Hay distritos como Pantitlán o Moctezuma donde existe una clara variación entre el valor observado y resultante del modelo. Estas

variaciones pueden atribuirse a errores de muestreo, como una muestra demasiado pequeña para estudiar orígenes-destino correspondientes a estos distritos. Se pudo identificar que para los distritos Moctezuma y Pantitlán, que son los que mayor diferencia tienen, existen varios orígenes-destino con muestras muy pequeñas que no permiten un ajuste correcto a una distribución de probabilidad. Se atribuye a esto la diferencia de demandas entre el modelo y los valores observados. Este problema está presente en otros distritos, donde también se encuentra que hay muestras demasiado pequeñas, pero en menor medida que para estos dos distritos.

- Se obtuvo una distribución por modo con valores muy cercanos a los observados, con la excepción del distrito Zócalo. Esto puede atribuirse a que el modelo se basa en una relación entre la decisión, el costo y el tiempo de viaje. Obedeciendo a la relación matemática encontrada, el modelo propone la distribución esperada. En la mayoría de distritos el comportamiento es de ese modo, pero para Zócalo se puede tener un comportamiento diferente, en donde la decisión se base más en otros factores que en el costo y el tiempo de viaje.
- Otras variaciones grandes observadas a simple vista son para los distritos Moctezuma y Pantitlán. Esto es consecuencia de la diferencia generada desde la demanda total, atribuible a errores de muestreo como se mencionó anteriormente.

Del análisis de datos obtenidos mediante la comparación entre el Escenario Base (actual) y el Escenario Alternativo (simulando la existencia de la línea 4 del Metrobús), se puede concluir lo siguiente:

- Se presenta una variación en la demanda importante para los modos Resto de los modos e Infraestructura. El modo Individual permanece muy similar al valor original. Con sentido común se puede pensar en que quienes utilizan el transporte público habitualmente son más susceptibles a probar nuevos modos que quienes poseen un transporte particular.
- El modo Infraestructura gana la demanda que Resto de los modos pierde. Esto se puede interpretar como que la implementación de la Línea 4 del Metrobús absorberá demanda de otros modos. La diferencia total de viajes realizados es de 12297, que se realizarían en la nueva línea y que actualmente se encuentran distribuidos en los demás modos, especialmente Resto de los modos.
- Es conveniente mencionar que se espera que la Línea 4 del Metrobús realice más viajes que la diferencia mencionada, debido a que los viajes que se dejarían de hacer en Metro o en otras líneas del Metrobús no se ven reflejados en los resultados obtenidos, debido a que también pertenecen al modo Infraestructura.

4.4. Recomendaciones

Los modelos econométricos de transporte urbano tienen un papel muy importante en la planeación de proyectos que estén relacionados con el traslado de personas en una ciudad. Un modelo bien planteado y calibrado tendrá un comportamiento muy parecido a la realidad y será de gran utilidad para el estudio de transporte en todos los ámbitos.

Dichos estudios pueden aportar beneficios económicos y sociales que dan factibilidad a proyectos de infraestructura que contribuyen al desarrollo de una nación.

En materia de transporte, existen ciertos aspectos que deben ser considerados en la evaluación e implementación de nuevos modelos y proyectos; el primero es la capacidad que se tiene de trasladar personas, el segundo, la demanda de viajes que se deriva de las necesidades de las personas, el tercero es la infraestructura y modos de viajes que hay en un sistema, el cuarto corresponde a la necesidad misma del viajero y el quinto y no menos importante, los beneficios que se tendrán con el desarrollo del nuevo sistema.

Con la aplicación de modelos econométricos y simulación probabilística de los datos no solo se pueden crear escenarios tarifarios como los expuestos en ésta tesis, sino también, redes de transporte que involucren los nodos más importantes de un sistema y que contribuyan a ubicar la zona óptima para la construcción de terminales y estaciones.

Cada zona geográfica cuenta con diferentes parámetros que determinan el comportamiento del transporte urbano, por ello es importante determinar desde un principio la magnitud de las zonas geográficas que se someterán al estudio así como también el grado de detalle al que se puede evaluar un sistema sin llegar a un nivel de significancia que sea imposible de alcanzar, es decir, si tuviéramos que evaluar todo el sistema de transporte de la Zona Metropolitana y el Distrito Federal en su totalidad, se tendría que dividir en diferentes áreas (municipios, delegaciones, distritos, etc.), correr los escenarios requeridos y después integrarlos en un sólo.

Por otro lado, evaluar una ruta que pertenece a un área en específico puede mostrar con más detalle los requerimientos del proyecto, razón por la cuál se decidió simular la línea 4 del metrobús en ésta tesis.

Así mismo se puede inferir que cada zona geográfica tendrá diferentes necesidades y como consecuencia soluciones distintas, las cuales al final, forman parte de un sistema de transporte versátil y adecuado a los beneficios de cada región.

En el caso de la línea 4 del metrobús se puede decir que; el transporte urbano de personas en esa región será beneficiada casi al 100% y que se deben contemplar vehículos, estaciones y terminales que satisfagan el incremento de la demanda en un 2% (6,107 viajes) para que se obtenga un beneficio óptimo.

Todo lo anterior sirve como recomendación en la implementación de nuevos proyectos de infraestructura que cumplan con las expectativas de desarrollo que muchos analistas buscan para mejorar las redes de traslado humano día con día.

Bibliografía:

- **Urban Travel Demand Modeling**, Norbert Oppenheim, City University of Nueva York, 1995
- **Modeling Transport**, Juan de Dios Ortuzar & Luis G. Willumsen, Third edition, 2001
- **The Economics of Urban Transport**, Kenneth A. Small, First edition, 2007

Referencias:

1. Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México Cifras de operación. Consultado el 19 de enero de 2011.
2. ↑ Red de Transporte de Pasajeros: En vialidad y transporte, la mayor inversión del GDF. Comunicado del 17 de abril de 2006, consultado el 19 de enero de 2011.
3. ↑ Líneas de trolebuses, en la página en Internet del Sistema de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE-DF), consultada el 20 de enero de 2007.
4. ↑ Sistema de Transportes Eléctricos, en la página en Internet del STE-DF, consultada el 20 de enero de 2011
5. ↑ Transporte, en la página en Internet de la Setravi-DF, consultada el 20 de enero de 2011.