



ASOCIACION ARGENTINA
DE ECONOMIA POLITICA

ANALES | ASOCIACION ARGENTINA DE ECONOMIA POLITICA

XLVIII Reunión Anual

Noviembre de 2013

ISSN 1852-0022

ISBN 978-987-28590-1-5

EVOLUCIÓN Y EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE
PÚBLICO EN EL ÁREA DE BUENOS AIRES:
1960-2013. CONGESTIÓN Y DETERIORO

Antuña Cepellotti Cristian

Jenik Ezequiel

Santaella Gonzalo

Vernhes Gastón

UNIVERSIDAD TORCUATO DI TELLA

Evolución y Evaluación del Transporte Público en el Área de Buenos Aires: 1960-2013. Congestión y deterioro

Servicio del Conurbano a la Capital

Andrés Neumeyer
Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes

Índice

1. Introducción	4
2. Evolución Empírica	5
2.1. El norte del conurbano	8
2.1.1. Mitre	9
2.1.2. Belgrano	10
2.1.3. Línea 60	10
2.2. El oeste del conurbano	11
2.2.1. Sarmiento	11
2.2.2. Urquiza	12
2.2.3. San Martín	13
2.2.4. Línea 88	13
2.3. El sur del conurbano	14
2.3.1. Roca	14
2.3.2. Belgrano Sur	14
2.3.3. Línea 8	15
2.4. Los viajes urbanos	15
2.4.1. El Metrobús	16
2.4.2. Los subterráneos	16
2.4.2.1. Línea A	17
2.4.2.2. Línea B	18
2.4.2.3. Línea C	18
2.4.2.4. Línea D	19
2.4.2.5. Línea E	20
2.4.2.6. Línea H	20
2.4.3. Pre Metro	20
2.5. Ejemplos	21
3. El modelo utilizado	23
3.1. Marco conceptual	23
3.2. El problema del individuo	24
3.3. El equilibrio	24
3.4. El óptimo social	26
4. Modelado de la red de Buenos Aires	27
4.1. Parametrización y calibración	27
4.2. Cómputos	32
5. Cómputo del modelo	35
5.1. Cómputo calibrado para reflejar la red circa 1.960 y 2.013	35
5.2. Ejercicios de estática comparada	36
6. Otras distorsiones	41
6.1. Incentivos a usar el automóvil	41
6.2. El deterioro del transporte como un impuesto	42
7. Comentarios finales	43
8. Referencias	44
9. Apéndice	45

1. Introducción

En el siguiente trabajo se presenta una revisión del servicio de transporte público en el Área Metropolitana de Buenos Aires. Se ha escrito extensa literatura sobre la teoría de la economía del transporte y ha sido aplicada al estudio de diversas redes en el mundo. Sin embargo, poco se ha escrito sobre la red porteña. Este escrito en particular, se centra en los viajes inter-urbanos realizados desde las afueras del Área hasta el centro de la Ciudad de Buenos Aires.

Como primera aproximación, se aporta a la literatura una recopilación de datos sobre el servicio brindado en la década de 1960 y el que se ofrece en la actualidad. Se han buscado indicadores del estado del sistema, discriminados según medio de transporte y línea utilizada. De esta manera, se pretende obtener una noción acerca de cómo ha evolucionado el transporte público a lo largo del tiempo y cuáles son aquellas variables que pueden ayudar a analizar este cambio.

Utilizando herramental teórico, se modela y calibra el problema que enfrenta un individuo que vive en el conurbano bonaerense y que debe trasladarse al centro de la capital, dados los distintos medios con los que cuenta para tal fin y las demandas de viaje entre ciudades. Se refiere al concepto de equilibrio de Wardrop del sistema, y al del óptimo del mismo para, de esta manera, tener una medición de cuán ineficiente es la red. Asimismo, se realizan ejercicios de estática comparada para completar el análisis contrastando la hipótesis.

El resto del trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan los datos descriptivos y la evolución de los distintos medios de transporte, mediante la exposición de indicadores de la calidad del servicio, tanto en la década de 1960 como en el período actual. La sección 3 desarrolla el marco teórico que será utilizado a lo largo del estudio. En la sección 4 se formula la descripción de la red con la que se ha trabajado, se definen el modelado de la misma, y se presentan y resuelven los problemas que enfrenta el individuo cuando maximiza su utilidad y el de un planificador social. La sección 5 describe distintos ejercicios de estática comparada y sus resultados. La sección 6 es un breve repaso de las ramificaciones que se pueden estudiar para complementar esta tesis. Finalmente, en la sección 7, se expondrán las distintas conclusiones que se han derivado de este trabajo.

2. Evolución Empírica

En esta sección se presentan datos empíricos acerca de los distintos medios de transporte. La información recopilada se ha buscado en vistas de realizar una comparación entre el servicio que se presta actualmente y aquel que se proporcionaba en la década de 1960. Permite, también, realizar la calibración de modelos teóricos que se desarrollan más adelante en el trabajo, y el uso de los mismos en el análisis posterior.

Para ello, el capítulo se encuentra dividido en cinco secciones, donde las primeras tres describen la evolución del transporte inter-urbano del área metropolitana, dividida en Norte, Oeste y Sur, y la cuarta se refiere a viajes urbanos, esto es, realizados íntegramente dentro de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. La sección final da un tratamiento más tangible a ésta revisión mediante el uso de recorridos teóricos a modo de ejemplo.

Se han utilizado diversas fuentes para el presente trabajo. Por un lado, se visitaron Organizaciones Civiles como la Asociación Amigos del Tranvía (AAT), el Museo Nacional Ferroviario y el Archivo Frías. Por otro lado, se ha asistido a diversas Organizaciones Gubernamentales como la Comisión Nacional de Regulación del Transporte (C.N.R.T), el

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (I.N.D.E.C), el Ministerio de Transporte de la Nación, el Ministerio de Desarrollo Urbano del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires y Subterráneos de Buenos Aires (SBASE) y la Biblioteca Nacional. Por último, se han consultado los informes, tanto de la Investigación de Transporte Urbano de Buenos Aires (INTRUPUBA), como el de La Encuesta de Movilidad Domiciliaria en el Área Metropolitana de Buenos Aires (ENMODO). Ambos informes fueron realizados bajo el El Proyecto de Transporte Urbano para Áreas Metropolitanas (PTUMA), dependiente de la Secretaría de Transporte, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios de la Nación.

Asimismo, en casos donde ha sido precisa información no disponible en las fuentes anteriormente mencionadas, los autores han recopilado datos de campo por cuenta propia. Fundamentalmente, los datos referidos al servicio de ferrocarriles en fechas posteriores al 2.012 no se encontraban entre los datos disponibles anteriormente mencionados, por lo que su recorrido, tiempo de viaje y frecuencia han sido medidas mediante el uso del servicio por parte de quienes escribieron este estudio.

Resta, antes de comenzar la exposición de los datos recolectados, describirle brevemente al lector el área geográfica abarcada en este estudio. En primer lugar, se debe recordar que todos los viajes estudiados tienen como destino el centro de la Ciudad de Buenos Aires. Son los barrios de Monserrat, San Nicolás, Puerto Madero y parte de Retiro. En ellos se concentran una enorme cantidad de destinos laborales puesto que allí se encuentran, entre otras cosas, las sedes del gobierno Nacional y de la Ciudad de Buenos Aires, así como la totalidad de los ministerios nacionales y una amplia mayoría de los porteños. El Congreso de la Nación se ubica en el barrio de Monserrat, y un poco más al norte, en el barrio de San Nicolás, se encuentran también los tribunales que son sede del Poder Judicial de la Nación. Se localizan cercanos el edificio de Aduanas y el Libertador, sede del Estado Mayor del Ejército. Están ubicadas allí también las sedes centrales de los principales bancos y entidades financieras de la República; los edificios y torres de oficinas más grandes de la ciudad también están allí (edificios Malecón, República, torres Catalinas, torres Bouchard y Bouchard Plaza, edificio Y.P.F., torre I.B.M., entre otros tantos). En ciertas calles, como Lavalle, Florida, Talcahuano o Libertad, se desarrolla una intensa actividad comercial. Finalmente, también es sede de teatros, galerías, cines y, en general, de locales de esparcimiento y entretenimiento.

La partida de los viajes estudiados se realiza en las afueras del Área Metropolitana, en el llamado Gran Buenos Aires, o Conurbano. El norte de éste zona abarca los partidos de Vicente López, San Isidro, San Fernando, Tigre, General San Martín, San Miguel, José C. Paz, Malvinas Argentinas, Pilar. Concentra gran cantidad de barrios y urbanizaciones cerradas (también llamados barrios privados o “country clubs”) habitados por personas con un alto poder adquisitivo, entre ellos, se ubican barrios abiertos de sectores menos pudientes e, inclusive, barrios marginales comúnmente llamados villas de emergencia. Se conecta con el centro de la ciudad a través de los distintos ramales de la Autopista Panamericana (el llamado “Acceso Norte”), los ferrocarriles Mitre, San Martín, Urquiza y Belgrano Norte y diversas líneas de colectivos. El Oeste del Conurbano consta de los partidos de La Matanza, Merlo, Moreno, Morón, Gral. Rodríguez, Marcos Paz, Hurlingham, Ituzaingó y Tres de Febrero. Es una zona de urbanización más reciente, que ha recibido gran parte de la migración desde el interior del país y, en épocas más recientes, desde países fronterizos. Su perfil de ingreso varía entre los bajos y los medios, con excepciones en algunos barrios privados desarrollados en la zona. Está densamente poblada en la actualidad, incluye por ejemplo al partido de La Matanza, que con más de 1,7 millones de habitantes, solo es superado en población por cuatro provincias. Se comunica con el centro a través de las autopistas Acceso Oeste y General Ricchieri, los

ferrocarriles Sarmiento y Belgrano Sur, además de colectivos. Finalmente, el sur de la región está compuesto por los partidos de Avellaneda, Quilmes, Berazategui, Florencio Varela, Lanús, Lomas de Zamora, Almirante Brown, Esteban Echeverría, Ezeiza, Presidente Perón y San Vicente, tradicionalmente separada de la Ciudad de Buenos Aires y la zona Oeste por el Riachuelo o Río Matanza. Tradicionalmente, era el centro industrial de la zona; con la decadencia de esta actividad, el perfil de ingresos local pasó a ser muy disperso, encontrándose asentamientos de todas las clases en la zona. Las autopistas que unen la zona con la Ciudad de Buenos Aires son la Buenos Aires – La Plata (acceso Sur) y el llamado camino negro. Los ramales del ferrocarril Roca transitan desde aquí hasta la Ciudad de Buenos Aires. Se describirán en detalle ahora los medios de transporte entre estas zonas y el centro.

2.1) El norte del Conurbano

El análisis de la movilidad inter-urbana se ha realizado discriminando medio utilizado, y en cada uno, diferenciando también entre las líneas disponibles. Como comienzo, se ha observado el servicio de trenes; las líneas disponibles para recorrer el norte del Conurbano son las llamadas Mitre y Belgrano Norte. Luego, se ha analizado el servicio del transporte automotor tomando en cuenta una línea representativa, como ser, la línea 60.

2.1.1) Se analiza primero el servicio de la línea Mitre. Sus cabeceras se encuentran en el partido de Tigre (estación Tigre) y en el barrio porteño de Retiro (estación Retiro), distanciadas ambas por un recorrido de 30,1 kilómetros. Actualmente, es operada por la Unidad de Gestión Operativa Mitre Sarmiento (U.G.O.M.S.), una entidad estatal. El tiempo de viaje desde Tigre hasta Retiro en el año 1960 era de 46 minutos. Así, resulta que la velocidad media de viaje para aquella época era de 38,42 km/hora. Actualmente, el tiempo medio de viaje para este mismo recorrido es de 75 minutos, por lo tanto, la velocidad media ha disminuido a 24,08 km/hora. Para el año 1960, la cantidad de viajes realizados por día era de 127, en donde 31 de ellos se realizaban de 6 a 10 hs y 23 de 17 a 20 hs, horario en el cual la demanda alcanza un pico. Por otro lado, si se comparan estos datos con los de hoy en día, la cantidad de viajes diarios ha disminuido a 100, donde solamente 22 se realizan de 6 a 10 hs y 19 de 17 a 20 hs. Se observa una notoria disminución de la frecuencia. Para el año 1.969, la cantidad de pasajeros urbanos y suburbanos que utilizaban la línea por día era de 85.235, mientras que la cantidad de pasajeros para un día típico del año 2007 fue de 214.896. Se observa que, aún con menor cantidad de viajes realizados por día, se transportan más del doble de pasajeros.

2.1.2) Se ha pasado luego a analizar el servicio de la línea Belgrano. Previamente, se hace mención de que esta línea se encuentra dividida en la Línea Belgrano Norte y Línea Belgrano Sur. La primera fue concesionada a la empresa Ferrovías, y la segunda es gestionada por la Unidad de Gestión Operativa Ferroviaria de Emergencia (U.G.O.F.E.) tras rescindírsele el contrato a la empresa Metropolitano. En este inciso, es analizado el recorrido de la línea Belgrano Norte, que va desde Villa Rosa (en el partido de Pilar) hasta Retiro, siendo este el mismo recorrido que realizaba la línea Belgrano en la década de 1960. Comenzando por el tiempo de viaje, en 1960, la línea Belgrano tardaba 78 minutos en realizar su recorrido. Hoy en día, ese mismo viaje es realizado por la línea Belgrano Norte en 80 minutos. Por otro lado, enfocándose en la cantidad de viajes, en 1960 el total de los mismos era de 132 en el transcurso del día, 21 de esos viajes se realizaban de 6 a

10 hs y 28 de 17 a 20 hs. Actualmente, se realizan 84 viajes en todo el día¹, donde 19 van desde las 6 hasta las 10 horas de la mañana y 11 durante la franja de 17 a 20 hs. Por último, la cantidad de pasajeros por día que viajaban en la línea Belgrano en 1969 era de 64.302. Para 2007, la cantidad de pasajeros que utilizaban la línea Belgrano Norte era de 123.648.

2.1.3) Este inciso da paso al tratamiento del transporte inter-urbano de pasajeros realizado a través de transporte automotor. Este tipo de modalidad ha sido gerenciada de diversas maneras a lo largo del tiempo, desde la operación estatal directa hasta la concesión de trayectos exclusivos, pero siempre el trazado de los recorridos ha sido obra del estado, dividiéndolo tradicionalmente en distintas “líneas” que cubren determinados trayectos cada una. Dentro de la zona norte, como línea representativa de un viaje interurbano en esta zona se ha tomado la número 60, que realiza su recorrido entre el partido de Escobar y la Capital Federal. Teniendo datos de los archivos de la propia línea (compilados junto a los de otras empresas en el “Archivo Frías” consultado), se observa que un viaje típico alrededor del año 1.960 por este medio recorría 72,4 kilómetros en aproximadamente 103 minutos. Esto significaba una velocidad promedio de 42 kilómetros por hora. Desafortunadamente, no se cuenta con datos desagregados del servicio de transporte automotor urbano en la actualidad, por lo que la comparación realizada en este y los posteriores capítulos contrastan cada línea con datos acerca del transporte interurbano en general. Los mismos fueron obtenidos de encuestas realizadas por el ahora Ministerio de Interior y Transporte: ENMODO (del año 2.009/10) e INTRUPUBA (del año 2.007). De ellas surge que un viaje promedio de una línea de colectivos en la actualidad es de 21,25 kilómetros de longitud, realizándolo en unos 36,59 o 41,93 minutos, dependiendo si se toma la referencia de INTRUPUBA o ENMODO, respectivamente. Esto da un intervalo de velocidad promedio de entre 30 y 34 kilómetros por hora. Como se verá con el correr de los capítulos, se ha reducido la velocidad no solo con respecto a esta línea sino con respecto a un promedio ponderado de todas las analizadas para el período anterior; el cual resultó de 52 kilómetros por hora para viajes interurbanos. Con respecto a la frecuencia de los servicios, que permite aproximar un tiempo de espera del mismo, el método utilizado ha sido similar. Para la línea 60, alrededor de la década de 1.960, ésta resultaba ser de aproximadamente tres minutos, lo que pone una cota superior al tiempo de espera. Hoy en día, surge de la ENMODO que, de nuevo para el transporte automotor en general, este tiempo es casi el triple, unos 8,75 minutos en promedio. Cabe aclarar que esto se refiere específicamente al tiempo de espera, y no a una cota máxima como había sido la frecuencia anteriormente. Tomando un promedio con igual ponderación que el tiempo de viaje para la frecuencia, se tiene que a mediados del siglo pasado la espera promedio no superaba los cuatro minutos; hoy día se duplicó entonces.

2.2) El oeste del Conurbano

2.2.1) Desde la zona oeste del conurbano parten las líneas de trenes Sarmiento, Urquiza y San Martín. Se analizaron primero las características de la línea Sarmiento, que conecta el partido de Moreno con la estación de Once, en el barrio porteño de Balvanera. El tiempo de viaje era de 52 minutos alrededor de 1.960, mientras que, hoy en día, el mismo viaje se realiza en 70 minutos². La distancia de este recorrido es de 36,4 km, por lo

¹ Se han incluido los viajes que salen desde Del Viso y Grand Bourg

² Para esta, y todas las líneas, también es cierto que en determinadas ocasiones puede llegar a tardar 10 minutos más debido a que los trenes frenan en medio de un trayecto esperando a que el tren de adelante avance hacia la siguiente estación, liberando el destino de la primera.

que la velocidad media era de 42 km/hora en el primer período analizado, se observa también que la velocidad media disminuyó a 31,2 km/hora en la actualidad. Por otro lado, se ha recopilado información sobre la cantidad de viajes realizados por esta línea. En este caso no se cuenta con la cantidad total de viajes para 1960 con lo que solo son analizados los viajes en hora pico los cuales llegaban a ser de 16 en el horario de 6 a 10 hs y de 15 en el horario de 17 a 20 hs. Hoy en día, la cantidad de viajes en estos horarios son de 23 a la mañana y 16 a la tarde. Estos datos reflejan la situación anterior a un accidente del cual se hará un comentario más adelante. Resta un comentario sobre la cantidad de pasajeros por día en esta línea. Para el año 1969 la cantidad de pasajeros urbanos y suburbanos era de 119.654, ese número asciende a 239.555 en la actualidad.

Antes de finalizar con esta línea, cabe mencionar el accidente ocurrido en Once el 22 de febrero de 2012. Ese día, en horas de la mañana, una formación que llegaba a dicha cabecera sufrió un desperfecto en los frenos y colisionó contra los andenes de la misma, dejando un saldo de medio centenar de muertos y otros tantos heridos. Lamentablemente el servicio no ha cambiado en absoluto hasta el momento dado que no se han cambiado los trenes por nuevos. Las únicas medidas que se tomaron luego del hecho fueron, en primer lugar, pintar de nuevo la estación y las formaciones y, además, deshacerse de las formaciones más antiguas pasando de 24 a 18, lo que ha provocado una disminución en la frecuencia en la hora pico, empeorando aún más el servicio prestado. Finalmente, la última medida preventiva de nuevos accidentes similares adoptada es de tinte improvisado ya que, desde entonces, entre la anteúltima estación antes de llegar a Once (Caballito) y esta última, el tren empieza a frenar mucho antes de lo habitual llegando a la estación casi a velocidad nula, debido al mal estado de los frenos que siguen sin ser reparados. De hecho, el 13 de junio del 2013, en las inmediaciones de la estación Castelar, ha ocurrido otro accidente debido al mal mantenimiento, y tres personas perdieron la vida en el mismo.

2.2.2) Seguidamente, serán analizados los datos de la línea Urquiza. Para poder lograr unicidad en los datos se ha analizado el recorrido que conecta la cabecera Federico Lacroze, en el barrio porteño de Chacarita con Campo de Mayo (estación General Lemos), en el partido bonaerense de San Miguel. El tiempo de viaje para este recorrido durante el año 1960 era de 52 minutos, mientras que hoy en día es de 46. Teniendo en cuenta que la distancia recorrida es de 23,89 km, la velocidad media de los trenes para 1960 era de 27,56 kilómetros por hora y actualmente de 31,16 kilómetros por hora. Vale aclarar que en el recorrido que hacía esta línea en 1960 había muchas más estaciones, de manera que si se calcula el promedio de la velocidad teniendo en cuenta solamente aquellas estaciones que coinciden con las de hoy en día, la misma era de 30,35 km/hora en el primero de los períodos analizados. En cuanto a la cantidad de viajes, para 1960 este número era de 38 en todo el día donde 8 de ellos se realizaban de 6 a 10 hs y 6 de 17 a 20 hs. Al mirar los datos de hoy en día la cantidad de viajes por día es de 86 donde 26 de ellos se realizan en el horario pico de la mañana y 16 en el horario pico de la tarde. Finalmente, la cantidad de pasajeros por día en 1969 resultaba ser de 24.498 y en el año 2007 este número es de 77.117.

2.2.3) Pásese ahora a analizar la línea San Martín, cuyos trenes viajan desde Pilar a Retiro. El tiempo de viaje para este recorrido en 1960 era de 91 minutos. Actualmente, ese mismo viaje se realiza en 94 minutos. Dado que la distancia es de 55,4 km, la velocidad media para 1960 era de 36,52 km/hora; hoy en día no existe una diferencia notable, siendo ésta de 35,36 km/hora. En cuanto a la cantidad de viajes, en 1960 se realizaban 126 viajes en todo el día, donde 24 de estos viajes se realizaban en la franja

de 6 a 10 hs y 25 de 17 a 20 hs. Hoy en día la cantidad de viajes disminuyó a 98 en todo el día, donde 18 son de 6 a 19 hs y 18 también son de 17 a 20 hs. Finalmente, la cantidad de pasajeros por día aumentó respecto a 1969, cuando era de 51.438, ya que en 2007 pasó a ser de 115.875.

2.2.4) Por último, se observa ahora el transporte realizado mediante el servicio público automotor. Para el sector oeste del A.M.B.A. la línea de referencia tomada es la actual 88 (en la primer época estudiada se rotulaba 188) que cubre un trayecto entre Once y Lobos, pero, para conservar el estudio de viajes regulares entre el Conurbano y la Capital, sólo se ha considerado su ramal a Cañuelas. Éste, recorre íntegramente el partido de La Matanza, municipio de gran relevancia en el Área Metropolitana. De nuevo, se contrastó la velocidad promedio de entre 30 y 34 kilómetros por hora actuales con 54 kilómetros por hora que surgen de haber recorrido, en los sesenta, 126 kilómetros en 140 minutos. Se nota aquí también un deterioro. Sin embargo, puede resultar interesante detenerse en un aspecto de esta línea, que es su recorrido dentro de la Capital Federal. Hoy en día, ha desaparecido una distinción tajante que otrora existía entre servicios urbanos (dentro de la Ciudad de Buenos Aires) e interurbanos (que se prolongaban desde y hacia fuera de ella). Este sistema permitía en el primero de los períodos estudiados una mayor celeridad en los trayectos dentro de la Capital Federal para los servicios interurbanos, pues tenían prohibido tomar pasajeros en dichos tramos, además de tener allí paradas considerablemente más distanciadas: en promedio, cada 840 metros, en contraste con los 250 para líneas urbanas y que, hoy en día, se acerca al promedio general (o sea, de líneas con recorrido urbano e interurbano). Así, la línea 188 recorría sus 24,9 kilómetros de trayecto dentro de la capital en media hora, por lo que tenía allí una velocidad promedio de 50 kilómetros por hora. Se observa, pues, que tener este esquema permitía celeridad para las líneas con largos recorridos. El tiempo de espera de esta línea resultaba sin embargo similar al promedio actual, pues su frecuencia media era de doce minutos.

2.3) El sur del Conurbano

2.3.1) La línea de trenes Roca, con sus distintos ramales, recorre el área sur del conurbano bonaerense. El análisis del servicio de esta línea se detiene en el recorrido que va desde Alejandro Korn hasta Plaza Constitución, trayecto de unos 39,5 kilómetros. Al buscar el tiempo de viaje en 1960 se encontró que el mismo era de 63 minutos mientras que hoy en día es de 58 minutos. La velocidad media, entonces, era para 1960 de 35,9 kilómetros por hora mientras que en la actualidad esta velocidad es levemente mayor, unos 37,61 kilómetros por hora. Por otro lado, para conocer datos referidos a la cantidad de viajes se han encontrado registros del ramal que va desde La Plata a Plaza Constitución (vía Quilmes). La cantidad de viajes por día en 1960 era 80, donde 18 pertenecían al horario de 6 a 10 hs y 12 al horario de 17 a 20 hs. Hoy en día, el total de viajes que hace este recorrido es de 55 donde 10 pertenecen al horario de 6 a 10 hs y 8 van de 17 a 20 hs. Finalmente, queda ser mencionado el cambio en la cantidad de pasajeros por día. En 1960, la cantidad de individuos que utilizaban esta línea (contando todos los ramales) era de 104.136. En cambio, para un día típico del año 2007 este número aumentó a 399.968.

2.3.2) En cuanto a la línea Belgrano Sur, no se cuentan con datos de la década de 1960. Esto se debe a que esta línea no existía en aquel entonces. La empresa encargada de administrar la línea Belgrano era Ferrocarril Argentinos. A principios de los '90, en virtud de un decreto, se creó una nueva empresa dado que la gestión realizada por

Ferrocarriles Argentinos fue muy precaria. De esta manera, la administración pasó a manos de la empresa Ferrocarriles Metropolitanos (FE.ME.S.A.) donde se decidió dividir los servicios urbanos del Ferrocarril Belgrano en “Belgrano Norte” (Retiro-Villa Rosa) y “Belgrano Sur” (Buenos Aires – González Catán; Buenos Aires – Marinos del Crucero General Belgrano; Puente Alsina – Bonzi). Actualmente, se ha revocado la concesión de FE.ME.S.A. y la línea es administrada por la ya mencionada U.G.O.F.E. Según los datos obtenidos en INTRUPUBA, la cantidad de pasajeros transportados en un día típico para esta línea es de 35.738. Por otro lado, la cantidad de viajes realizados por día y el tiempo de viaje varía según el ramal. Aquellas formaciones que recorren el tramo Alsina-Bonzi realizan 5 viajes por día en 50 minutos. El ramal Buenos Aires – Marinos del Crucero General Belgrano realiza un total de 24 viajes por día tardando 73 minutos. Finalmente, la cantidad de viajes por día que se realizan a través del ramal Buenos Aires – Gonzalez Catán es de 47 donde cada viaje es realizado en 58 minutos. La distancia que separa a la estación Buenos Aires de Marinos es de 66,3 km de manera que se puede deducir una velocidad alcanzada por esta formación de 54,49 km/hora.

2.3.3) El transporte automotor de pasajeros aquí ha sido estudiado tomando como referencia la entonces línea 8 (hoy en día 98) que prestaba recorrido entre la Ciudad de Buenos Aires y el partido de Quilmes. Este trayecto de 58 kilómetros era recorrido en 55 minutos, resultando de ello una velocidad promedio de 63 kilómetros por hora. Por otro lado, su frecuencia media era de unos tres minutos. Aclaremos aquí que todas las frecuencias medias mencionadas en estos tres capítulos han sido tomadas entre las seis y las veintitrés horas, para captar el hecho de que la abrumadora mayoría de los viajes se realiza en ese intervalo y estimar así correctamente la espera que un pasajero tendría en el servicio. Asociado al tiempo de espera de los colectivos, la amplia red que existía, y existe, en el área permite que el tiempo perdido en acercarse a una parada a pie sea relativamente bajo. La ENMODO calcula que, antes de un viaje en colectivo, se caminan unas 2,45 cuadras en promedio y luego del viaje, unas 2,63 hasta llegar a destino. Si se tarda un minuto en promedio por cuadra, a los viajes de colectivo se les debe agregar solamente unos 5,08 minutos perdidos en caminar.

2.4) Los viajes urbanos

A partir de este momento serán analizados los medios de transporte que circulan dentro de la Capital Federal. De ellos se ha recopilado información, en primer lugar, del llamado “Metrobús”, que realiza un trayecto desde Liniers a Palermo, y luego del servicio del Subte y Pre-Metro que une distintos barrios de la capital con el centro de la ciudad.

2.4.1) El Metrobús

Dentro de la Ciudad de Buenos Aires existe el proyecto del Metrobús que, mediante la asignación de carriles exclusivos a los autobuses en algunas avenidas pretende aminorar el problema del tránsito para el transporte público automotor. Además, también ha podido distanciar las paradas a unos 400 metros entre ellas, permitiendo menor pérdida de tiempo por paradas y, finalmente, se han reforzado las líneas que circulan por allí, bajando la frecuencia a unos dos minutos de espera entre colectivo y colectivo. Según el Ministerio de Desarrollo Urbano del G.C.B.A., este formato ha permitido al Metrobús disminuir el tiempo de recorrido en un 40% respecto a la situación en la que los colectivos integraban el tráfico de la ciudad. Ya hemos dicho que un viaje promedio hoy en día tardaba alrededor de 41,93 (o 36,59) minutos y recorría 21,25 kilómetros, lo que daba una velocidad promedio de entre 30 y 34 kilómetros por hora. Si esquemas similares al Metrobús pudiesen ser implementados en gran parte de la red de transporte público

automotor, aún con mejoras más modestas del 30% del tiempo de viaje (o sea, pasar a 29,35 o 25,61 minutos de recorrido), la velocidad promedio ya mejoraría a entre 43 y 49 kilómetros por hora; algo similar a lo alcanzado por los esquemas interurbanos de la década del 60.

2.4.2) Los subterráneos

La red de subterráneos data del año 1.913, con la instalación de la línea A. Hasta la actualidad, se han sucedido incorporaciones y ampliaciones de líneas, habiendo hoy en día siete en total. Todos los recorridos de sus distintos ramales se realizan íntegramente dentro del territorio de la Ciudad de Buenos Aires. La red está empalmada con diversas líneas de colectivo y trenes; además, una de sus líneas (la llamada "E") se conecta en una de sus cabeceras con el llamado Pre-Metro. Éste es un tranvía que realiza un recorrido íntegramente dentro de la capital. Se verá a continuación información detallada por línea.

2.4.2.1) Línea A

Hasta 2012, el tiempo medio de viaje era de 23 minutos, comenzando en la estación "Carabobo" (en el barrio de Flores) y terminando en la estación "Plaza de Mayo" (el centro de la ciudad, barrio de Montserrat), recorriendo 10,7 km aproximadamente. Tomando estos datos, se puede deducir que esta línea, en promedio, viaja a una velocidad de 27,91 km/hora. Si se compara con la época de los 60's y 70's se encontrará, en primer lugar,, un recorrido reducido, que recién comienza en la estación "Primera Junta", es decir, 2 estaciones más cerca del Microcentro que en la actualidad. El viaje en subte se reducía a 20 minutos aproximadamente, entre estas dos cabeceras. Hasta aquí, se han tomado los datos hasta el año 2012. No obstante, debido a mejoras recientes en la línea A, se observa que el tiempo real de viaje es de 21 minutos aproximadamente, 2 minutos menos que antes de realizarse dichas mejoras. Entonces, en promedio, actualmente viaja a una velocidad de 30,57 km/hora, casi 3 km/hora más rápido. Por otro lado, la frecuencia de la línea A es, actualmente, de 5' 06".. Para compararla con la frecuencia de antes, al no disponerse de datos concretos sobre la misma, se ha estimado mediante la cantidad de viajes que se realizaban por año, llegando a que la frecuencia era de 2' 44". Como esta frecuencia es menor a la frecuencia actual real, el mismo cálculo se ha realizado también con los datos actuales a fin de clarificar más esta comparación. El resultado arroja que 2' 19" es la frecuencia estimada en este momento, la cual, al ser comparada con el proxy de antes, es bastante menor. En base a lo expuesto, es razonable suponer que la frecuencia real de los 60's y 70's era menor que la actual, por lo que ha mejorado a lo largo de los años.

Otro indicador de tiempo que se puede agregar al momento de analizar el viaje mediante un determinado medio es el de las cuadras caminadas antes y después de utilizar el medio de transporte. La cantidad promedio de cuadras que camina una persona tanto para acceder a la estación de origen de la línea A como para llegar al destino final del viaje es de 6,08. Además, se ha tenido en cuenta la cantidad de pasajeros pagos anuales. Cabe destacar que la línea A fue la única línea en la cual la cantidad de pasajeros pagos en la época anteriormente analizada era mayor que en la época actual. La caída en la cantidad de pasajeros pagos es de poco más del 40%, pasando de 70.000.000 personas por año a casi 42.000.000 aproximadamente.

2.4.2.2) Línea B

Actualmente, el tiempo medio de viaje de la línea es de 23 minutos comenzando en la estación "Los Incas" y terminando en la estación "L.N.Alem", recorriendo 10,15 km aproximadamente. Dados estos datos, esta línea tarda 2' 16" en recorrer un kilómetro, lo

que significa que la velocidad promedio es de 26,4 km/hora. Si son comparados estos datos con la época de los 60's y 70's, lo que se encontrará es que el recorrido recién comenzaba en la estación "Federico Lacroze", es decir, 2 estaciones más cerca del Microcentro que en la actualidad. El tiempo de recorrido promedio entre las estaciones era de 1' 31", por lo que el viaje en subte se realizaba en, casi, 20 minutos. Véase ahora la frecuencia de la línea B. En la actualidad, la misma es de 4' 51". De nuevo, al no estar disponible este dato para alrededores de la década de 1.960, se lo ha aproximado, obteniendo una frecuencia de 3' 19". No obstante, esta frecuencia es menor a la actual; la cual, estimándose de la misma manera, resultaría de 2' 22"; que en comparación con la aproximación del período pasado es bastante menor. Por ello, se cree que la frecuencia real de los 60's y 70's era menor que la actual, por lo que ha mejorado a lo largo de los años. Con respecto a las cuabras caminadas antes y después de utilizar la línea, éstas son en promedio 5,79. Cabe destacar que en la línea B no se dio un gran aumento en la cantidad de pasajeros pagos si se compara con las demás líneas de subte ya que dicho aumento fue de poco más del 4%, pasando de 72.700.000 personas a 76.200.000 aproximadamente. De todos modos, esta línea fue, y sigue siendo, aquella que presentaba la mayor cantidad de pasajeros pagos anualmente.

2.4.2.3) Línea C

Actualmente, el tiempo medio de viaje es de sólo 13 minutos, comenzando en la estación "Constitución" y terminando en la estación "Retiro", recorriendo 4,4 km. Así, esta línea tarda 2' 57" en recorrer un kilómetro lo que significa que la velocidad media es de 20 km/hora. Al comparar estos datos con la época de las décadas de 1960 y 1970, se encuentra que el recorrido no varió, ya que todas las estaciones de dicho subte fueron construidas alrededor de la década de 1930. El tiempo de viaje medio entre las estaciones de la línea C es de 1' 26", el más corto en minutos para una línea de subte sin tomar en cuenta la línea A luego de las mejoras que se le han realizado. Actualmente, frecuencia de la línea es de 4' 21". La aproximación para los años 60 resultó de 3' 01", y la misma para los datos actuales es de 2' 03", que mostraría una mejora, al igual que las líneas anteriormente analizadas. La cantidad promedio de cuabras que camina una persona tanto para acceder a la estación de origen de la línea C como para llegar al destino final del viaje es de 5,79. En cuanto a la cantidad de pasajeros pagos anuales, cabe destacar que en esta línea no se dio un fuerte aumento en la cantidad de pasajeros pagos. La variación fue de casi 2,5%, pasando de 48.500.000 personas a 49.700.000 aproximadamente entre los períodos considerados.

2.4.2.4) Línea D

En la actualidad, el tiempo medio de viaje de la línea, es de 26 minutos, comenzando en la estación "Congreso de Tucumán" y terminando en la estación "Catedral", recorriendo 10,41 km. De ello resulta que esta línea tarda 2' 30" en recorrer un kilómetro, lo que significa que, en promedio, viaja a una velocidad de 24 km/hora. Al comparar el servicio con aquel prestado en las décadas de 1960 y 1970, se observa que el recorrido recién comienza en la estación "Palermo", es decir, 5 estaciones más cerca del Microcentro que en la actualidad. El tiempo de recorrido promedio entre las estaciones es de 1' 37". La frecuencia actual de esta línea es de 4' 30", la estimada para 1.960 era de 3' 45" y la estimada para la actualidad de 2' 14" mostrando de nuevo una mejora. Nótese que, actualmente, tiene una de las mejores frecuencias dentro de este tipo de transportes. Las cuabras promedio caminadas por quienes usan este transporte son de 6,18. Cabe destacar que en la línea D se dio el mayor aumento de pasajeros pagos si se comparan

las dos etapas del análisis. Dicho aumento fue de poco más del 100%, pasando de 36.100.000 personas a 72.800.000 aproximadamente.

2.4.2.5) Línea E

La longitud del recorrido de esta línea es de 12 km, donde el tiempo de viaje es de 24 minutos, recorriendo las estaciones que se encuentran entre “Plaza de los Virreyes” y “Bolívar”. Esta línea es la que tiene la mayor velocidad promedio, la cual es de 30 km/hora.. Al comparar entre las décadas analizadas, se observa que 11 de las 15 estaciones de esta línea fueron inauguradas en ese período, lo que dificulta su comparación. La frecuencia en la actualidad es de 6' 28" entre formaciones. La aproximación para 1.960 resultó de 4' 34" y para 2.013 de 3' 10". Además 6,33 cuadras suelen ser caminadas antes o después de usar este servicio. En la línea E se dio el segundo mayor aumento de pasajeros pagos cuando se comparan las dos etapas de análisis, detrás de la línea D. Dicho aumento fue de poco más del 63%, pasando de 11.300.000 personas a 18.500.000. No sorprende este cambio relativo, ya que ha sido una de las líneas que más se ha expandido entre los períodos.

2.4.2.6) Línea H

Esta línea es la más nueva de todas. Fue inaugurada el 18 de octubre de 2007, por lo que no se puede comparar con el período antes visto. Actualmente, el tiempo medio de viaje de la línea, realizando todo el recorrido, es de sólo 11 minutos, comenzando en la estación “Parque Patricios” y terminando en la estación “Corrientes”, recorriendo 5,5 km, aunque el proyecto final prevé una extensión de 11 km. Viaja entonces a una velocidad promedio de 30 km/hora. En cuanto a la frecuencia, es de 6' 48". Debido a que esta línea es relativamente nueva, no es posible compararla con el período de los 60's y 70's. Se puede destacar que tiene el mayor tiempo de espera de entre las líneas de subte. Alcanza un total de 4.800.000 pasajeros pagos anualmente.

2.4.3) Pre Metro

El servicio Pre Metro, inaugurado en 1.987, puede comenzar de dos lugares diferentes, desde “Centro Cívico Lugano” o “General Savio”, ambos localizados en el barrio porteño de Lugano, y termina en la cabecera denominada “Intendente Saguiet”, donde es posible realizar un trasbordo con la línea “E” de subterráneos. Los viajes demoran 23 y 25 minutos, recorriendo 6,3 y 7,1 km respectivamente, obteniendo una velocidad promedio del Pre Metro es de 16,74 km/hora. Su frecuencia actual resulta en 7' 45", y se suelen caminar 4,4 cuadras al usar el servicio.

2.5) Ejemplos

A modo de ilustrar la información hasta aquí mencionada, se compara el tiempo utilizado en realizar un viaje en 1960 y cuánto se demora en la actualidad para realizar el mismo. El lector no encontrará aquí nueva información disponible, pero resulta ilustrativo a fin de observar de manera más tangible el deterioro en el servicio de transporte.

En primer lugar, se considera un viaje entre Moreno hasta la Plaza de Mayo. La forma más directa de realizar este recorrido es mediante la línea Sarmiento hasta la estación Once y, de ahí mismo, tomar el subte A hasta Plaza de Mayo. Dados los datos expuestos anteriormente, el tiempo de viaje que llevaba este viaje en 1960 era de 65 minutos³. Hoy en día, el mismo viaje se puede hacer en 82 minutos. De esta manera, notamos un aumento de 26% en el tiempo.

³ 52 minutos en tren y 13 minutos en subte

En segundo lugar, se analiza un recorrido desde San Miguel hasta el Microcentro. Una alternativa posible es a través de la línea Urquiza (estación Campo de Mayo) hasta Federico Lacroze y, de allí, tomar el subte B hasta Leandro N. Alem. En 1960, este se tardaba 72 minutos en hacer este recorrido. Actualmente, ese tiempo de viaje casi no se ha visto modificado tardándose unos 66 minutos.

Por último, se considera un viaje desde Quilmes hasta Palermo. Una manera posible es viajar en la línea 8 hasta el Centro de la ciudad y, desde allí, tomar la línea de subte D hasta la estación Palermo. Esta viaje demoraría, en 1960, 73 minutos. En el día de hoy, el mismo recorrido se puede realizar en 112⁴ minutos, de manera que el tiempo de viaje ha aumentado en un 53 %.

⁴ 94 minutos en colectivo y 18 en subte

3) El modelo utilizado

En el presente capítulo se detallará la metodología utilizada para modelar la red de tránsito público inter-urbano de Buenos Aires. Con el mismo, serán realizados distintos ejercicios teóricos. Para ello, esta parte del informe en ha sido dividida en 5 secciones, donde la primera referencia las definiciones y notación utilizadas a lo largo del modelo. Luego se presenta el problema al que se enfrenta un individuo que maximiza su utilidad en una red de transporte y, a partir de allí, cómo es posible definir un equilibrio en este contexto. Una vez hecho esto, se analizará la diferencia entre el equilibrio entre decisiones individuales de aquella situación que surge bajo la autoridad de un planificador social. Esto es, será evaluada la pérdida de bienestar comparando la diferencia que surge en este contexto entre la asignación de equilibrio y la óptima.

3.1) Marco conceptual

En esta sección se definirán los conceptos que serán utilizados a largo de la modelización. Se comenzará definiendo los elementos que componen una red con congestión.

Siguiendo a Correa y Stier-Moses [2], una red de transporte está caracterizada por tres vectores exógenos $R = (N, A, D)$, donde $N = (n_1, n_2, \dots, n_h)$ hace referencia a los h nodos, es decir, los puntos entre los que existe un medio de transporte. Siguiendo, $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ son los m arcos que representan caminos que conectan, para el s -ésimo arco, el nodo i_s con el k_s . Existe un costo $c(a_s)$ asociado al mismo en función del medio que lo recorre y del flujo f_s que circula sobre él. El tercer vector, $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, son las n demandas, las cuales indican la cantidad de personas, para la z -ésima demanda, que deben ir de un nodo j_z a otro l_z . Finalmente, frecuentemente se ha de referir al vector de flujos que existen sobre los arcos $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$

Por otro lado, se define una ruta $r = (a_{r1}, a_{r2}, \dots, a_{rx_r})$ entre los nodos a y b como una combinación ordenada de arcos, donde el origen del primero es a , el destino del último b , y para cualquier $i < x$, el destino del $(i-1)$ -ésimo arco es el origen del i -ésimo. Asimismo, f_r es el flujo que circula sobre ella.

Dados todos estos datos exógenos, se determina endógenamente el vector de rutas para cada demanda z , $R^z = (r_1^z, r_2^z, \dots, r_{q_z}^z)$, que son las q_z rutas que conectan el origen de la demanda con su destino.

3.2) El problema de un individuo

Dado un individuo que demanda un viaje entre dos nodos, este toma la red y el comportamiento ajeno como exógenos y debe elegir, de entre todas las rutas que conectan ambos nodos, aquella que le representa un costo menor:

$$\min_{\{r_i^z \in R^z\}} \sum_{t=1}^{t=xr_i^z} c(a_{r_i^z t}) := c(r_i^z) \quad (1)$$

Donde $a_{r_i^z t}$ corresponde al t -ésimo arco que compone la i -ésima ruta que cubre la z -ésima demanda.

3.3) El Equilibrio

Para una red de transporte, se define un equilibrio de Wardrop [2,3] como un vector de flujos sobre los arcos, $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*)$ tal que, dado el vector de flujos f^* , se cumple que:

- i) Para cualquier demanda z , todo individuo i_z perteneciente a ella resuelve su problema de minimización (1) realizando su viaje por la ruta elegida.

ii) Se cumplen las condiciones de consistencia agregada, que implican que, dado un vector de flujos f^* :

- Hay consistencia agregada en las demandas: la suma de los individuos que recorren cada una de las rutas es exactamente igual a la demanda:

$$\sum_{i=1}^{i=q_z} f_{r_i^z} = d_z \quad \forall z \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

- Hay consistencia en cada arco con respecto a las rutas que lo recorren:

$$\sum_{r|r \in a_i} f_r = f_i^* \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

Como se verá, las condiciones que caracterizan un equilibrio de Wardrop equivalen a una condición de no arbitraje entre las rutas relevantes que cubren una misma demanda: el costo de realizar el viaje por cualquiera de ellas es igual. Por ruta relevante, se refiere a aquellas rutas por sobre las cuales en equilibrio transita un flujo positivo de pasajeros. Esta afirmación será demostrada en el siguiente teorema:

Teorema 1: Un vector de flujos es un equilibrio de Wardrop si, y solo si,

1_Dada cualquier demanda d_z , no existe arbitraje entre las rutas relevantes que la cubren.

2_Se cumplen las condiciones de consistencia (2) y (3).

Demostración:

(\Rightarrow) Sea el vector f^* un equilibrio de Wardrop.

Supóngase z' demanda para la cual no se cumple la condición de no arbitraje, ergo, existen r y r' , que cubren z y tales que $c(r) > c(r')$. Entonces, como la ruta r es efectivamente utilizada (por ser relevante), existirá para cualquier individuo i_z de z que la recorra una opción para viajar a menor costo, r' , por lo que i_z no estaba resolviendo su problema de minimización dado f^* . Luego, f^* no es un equilibrio de Wardrop.

(\Leftarrow) Sea el vector f^* tal que se cumple para toda demanda la condición de no arbitraje entre rutas relevantes. Sea f^* tal que también cumple las condiciones de consistencia.

Sea i un individuo de cualquier demanda. Para cualquier ruta r que tiene disponible para realizar su viaje, el costo es el mismo $c(r)$, precisamente, porque se cumple la condición de no arbitraje. En particular, no puede elegir una ruta con un costo menor a $c(r)$, entonces, está eligiendo una ruta que minimiza su costo, sea cual sea. Luego, todos los individuos resuelven su problema dado f^* y, como también cumple las condiciones de consistencia, f^* es un equilibrio.

Se establece así la doble implicación,

Quod Erat Demonstrandum

En la siguiente sección serán computados equilibrios de Wardrop de distintas redes. Para esto, se recurrirá al siguiente teorema, demostrado en [1]. Antes, se introduce la siguiente notación para el costo de un arco: $c_s(f_s) := c(a_s)$, pues es conveniente expresarlo como función del flujo que recorre dicho arco.

Teorema 2: Si las funciones de costos $c_i(-)$ sobre los arcos son no negativas, no decrecientes e integrables en cualquier intervalo $[0, a]$, $a \in \mathbb{R}$, los flujos de un equilibrio de Wardrop son la solución al problema:

$$\min_{\{f \in X\}} \left\{ \sum_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \int_0^{f_i} c_i(z) dz \mid f \in X_f \right\} \quad (4)$$

Donde X es el conjunto de posibles flujos y X_f es la proyección de esos flujos sobre el espacio de los arcos. Decir que un vector de flujos f pertenece a X_f es otra manera de expresar que se cumple la condición de consistencia (3).

El quid de este teorema yace en que las condiciones de minimización de este problema equivalen a las que garantizan la no existencia de arbitraje entre rutas. Por el teorema 1, se ha visto que tal garantía, junto con la consistencia, asegura que ese flujo es un vector de equilibrio. Además, las condiciones pedidas a las funciones de costos garantizan que las funciones objetivo son diferenciables y convexas, por lo que el mínimo existirá, y con él el equilibrio.

3.4) El Óptimo Social

En la sección anterior se ha descrito el equilibrio donde cada individuo minimiza su costo de viaje. No obstante, esto no es necesariamente óptimo dado que los individuos no tienen en cuenta la externalidad negativa que le imponen a los demás a través del aumento en el nivel de congestión en el arco que usan. Es por ello que, en esta sección, es planteado el problema que resolvería un planificador benevolente que busca minimizar el tiempo total de viaje para todos los individuos, de manera de alcanzar la solución eficiente. A continuación se define formalmente el problema de este planificador.

Un vector de flujos sobre rutas $R^* = (r_1^*, r_2^*, \dots, r_{x_r}^*)$ es un óptimo social en una red de tránsito si:

_Dado ese vector, estos flujos minimizan la suma del costo de todos los arcos de la red:

$$R^* = \arg \min_{\{R\}} \sum_{t=1}^{t=m} c(a_t) \quad (5)$$

Donde $\{R\}$ es el conjunto de todos los flujos sobre rutas posibles.

_Se cumplen las mismas condiciones de consistencia que en un equilibrio. O sea, valen las ecuaciones (2) y (3).

4) Modelado de la red de Buenos Aires

4.1) Parametrización y calibración

Dado el marco teórico general descrito en la sección anterior, el paso posteriormente tomado fue el de modelar la red de transporte interurbano de la Ciudad de Buenos Aires con el mismo. Primeramente, entonces, se determinó el vector que describe la red: $R_{B.A.} = (N_{B.A.}, A_{B.A.}, D_{B.A.})$. Para simplificar el cómputo del equilibrio y del óptimo de dicha red, se separó a la misma en tres redes independientes, que las llamamos Buenos Aires Norte, Buenos Aires Oeste y Buenos Aires Sur (respectivamente $R_{B.A.}^N, R_{B.A.}^O$ y $R_{B.A.}^S$). Sus componentes quedaron determinados de la siguiente manera:

Para la red norte, $R_{B.A.}^N$, se tomaron:

Los nodos $N_{B.A.}^N = \{\text{Norte, Noroeste, Lacroze, Retiro, Centro}\}$.

Donde Norte es un nodo genérico que engloba las cabeceras de los trenes que existen en la zona norte del A.M.B.A. (Tigre y Villa Rosa), Noroeste hace lo mismo con las cabeceras del noroeste de la región (Pilar y General Lemos). Lacroze se identifica con la estación Federico Lacroze de la línea B de subterráneos (lugar de transferencia con el ferrocarril Urquiza), Retiro con las cabeceras de los ferrocarriles Mitre y Belgrano Norte dentro de la Capital Federal, y Centro es un nodo genérico que representa el destino de todos los viajes en la red considerada. Se tiene, entonces, que el presente estudio se centró en los viajes originados en el Conurbano y cuyo destino se ubica dentro de la zona céntrica de la Capital Federal.

Los arcos, siguiendo la teoría, han sido caracterizados por su origen, destino y medio que los cubre.

$$A_{B.A.}^N = \left\{ \begin{array}{l} \text{Norte} - \text{Centro, en colectivo} \\ \text{Noroeste} - \text{Centro, en colectivo} \\ \text{Norte (Tigre)} - \text{Retiro, en tren (línea Mitre)} \\ \text{Norte (Villa Rosa)} - \text{Retiro, en tren (línea Belgrano Norte)} \\ \text{Noroeste (Pilar)} - \text{Retiro, en tren (línea San Martín)} \\ \text{Noroeste (Lemos)} - \text{Lacroze, en tren (línea Urquiza)} \\ \text{Retiro} - \text{Centro, en subterráneo (línea C)} \\ \text{Lacroze} - \text{Centro, en subterráneo (línea B)} \end{array} \right.$$

Finalmente, las demandas han sido calibradas para reflejar la cantidad de pasajeros inter-urbanos diarios. Esto, con datos obtenidos de la encuesta INTRUPUBA, para los alrededores del año 2.013 y con los archivos citados para alrededores del año 1.960.

$$D_{B.A.}^N = \left\{ \begin{array}{l} \text{Norte} - \text{Centro} \left\{ \begin{array}{l} 189.349 \text{ personas circa 2.013} \\ 134.124 \text{ personas circa 1.960} \end{array} \right. \\ \text{Noroeste} - \text{Centro} \left\{ \begin{array}{l} 101.934 \text{ personas circa 2.013} \\ 70.316 \text{ personas circa 1.960} \end{array} \right. \end{array} \right.$$



Con la misma metodología ha sido determinada la red Buenos Aires Oeste, $R_{B.A.}^O$, tomándose:

Los nodos:

$$N_{B.A.}^O = \{Oeste, González Catán, Once, Plaza de los Virreyes, Centro\}.$$

Donde Centro repite el mismo concepto que en la red anterior; Oeste es un nodo genérico que engloba la cabecera del ferrocarril General Sarmiento en Moreno y la del Belgrano Sur en Merlo (llamada estación "Marinos del Crucero General Belgrano"). Once es la cabecera del ferrocarril Sarmiento dentro de la capital, y donde se realiza un traspordo con la línea A de subterráneos (estación Plaza Miserere). González Catán se corresponde con la cabecera (homónima) del otro ramal del ferrocarril Belgrano Sur y Plaza de los Virreyes es la cabecera de este nombre de la línea "E" de subterráneos. Si bien el ferrocarril Belgrano Sur se conecta con esta cabecera a través del servicio de premetro, por sencillez, se ha modelado el traspordo directamente allí.

Los arcos, por su parte, han sido

$$A_{B.A.}^O = \left\{ \begin{array}{l} Oeste - Centro, \text{ en colectivo} \\ González Catán - Centro, \text{ en colectivo} \\ Oeste (Moreno) - Once, \text{ en tren (línea Sarmiento)} \\ Oeste (Merlo) - Plaza de los Virreyes, \text{ en tren (línea Belgrano Sur)} \\ González Catán - Plaza de los Virreyes, \text{ en tren (línea Belgrano Sur)} \\ Once - Centro, \text{ en subterráneo (línea A)} \\ Plaza de los Virreyes - Centro, \text{ en subterráneo (línea E)} \end{array} \right.$$

Las demandas, y su calibración, resultaron ser:

$$D_{B.A.}^O = \left\{ \begin{array}{l} Oeste - Centro \left\{ \begin{array}{l} 168.161 \text{ personas circa 2.013} \\ 117.879 \text{ personas circa 1.960} \end{array} \right. \\ González Catán - Centro \left\{ \begin{array}{l} 41.481 \text{ personas circa 2.013} \\ 17.202 \text{ personas circa 1.960} \end{array} \right. \end{array} \right.$$



Finalmente, se tomó la red Buenos Aires Sur, $R_{B.A.}^S$:

$$N_{B.A.}^S = \{Berazategui, Korn, Constitución, Centro\}.$$

De nuevo, Centro es lo hasta aquí considerado. Berazategui y Alejandro Korn son cabeceras del servicio del ferrocarril General Roca. Y Constitución su cabecera dentro de la ciudad de Buenos Aires, cabecera también del subterráneo C que viaja hasta el centro.

Los arcos fueron:

$$A_{B.A.}^S = \begin{cases} \text{Berazategui – Centro, en colectivo} \\ \text{Alejandro Korn – Centro, en colectivo} \\ \text{Berazategui – Constitución, en tren (línea Roca)} \\ \text{Alejandro Korn – Constitución, en tren (línea Roca)} \\ \text{Constitución – Centro, en subterráneo (línea C)} \end{cases}$$

Por último, las demandas fueron:

$$D_{B.A.}^S = \begin{cases} \text{Alejandro Korn – Centro} & \begin{cases} 114.450 \text{ personas circa 2.013} \\ 76.980 \text{ personas circa 1.960} \end{cases} \\ \text{Berazategui – Centro} & \begin{cases} 135.511 \text{ personas circa 2.013} \\ 82.418 \text{ personas circa 1.960} \end{cases} \end{cases}$$



Ya se han establecido los vectores que caracterizan por completo la red utilizada. Como datos exógenos a establecer, restan aún las funciones de costo sobre cada arco.

Sobre los arcos recorridos por colectivos, se ha utilizado una función de costos muy común en la literatura, llamada Bureau of Public Roads (B.P.R.) cost function, la cual se ajusta a este medio al reflejar la congestión progresiva de este medio, a medida que aumenta el caudal de pasajeros por él transportado. La misma adopta la forma:

$$t_a(f_a) = t_c^0 \left(1 + \theta \left(\frac{f_a}{c_c} \right)^\eta \right)$$

Donde:

– $t_a(f_a)$ es el costo del arco a , dados el flujo y el medio del mismo.

– f_a es el flujo que recorre el arco a .

– Tanto η como θ son parámetros de ajuste. Respectivamente, han tomado los valores de 4 y 1, como es común en gran parte de la literatura.

– t_c^0 es el tiempo de viaje mínimo, sin congestión, de un arco recorrido por colectivos.

– c_c es el coeficiente de capacidad de los colectivos, que indica cuán rápido se congestiona este medio.

Los dos últimos parámetros han sido calibrados de manera distinta para la simulación de la red de los años 2.013 y 1.960. En el programa que se adjunta como

apéndice se incluyen los valores utilizados. La calibración del primero es una estimación del tiempo de viaje promedio de un colectivo por la noche, cuando no hay congestión. El segundo se ha calibrado teniendo en cuenta la cantidad de colectivos promedio por pasajero de cada época, así como la cantidad de gente que podía transportar uno de ellos en cada período. Resulta en una medida de “espacios” disponibles para los pasajeros en cada momento.

Para los arcos recorridos por subtes y trenes se ha utilizado la siguiente función de costos:

$$t_a(f_a) = t_i^0 + \frac{1}{g_i} \left\lfloor \frac{f_a}{c_i} \right\rfloor \quad i = s, t$$

Los corchetes indican la función parte entera, y el subíndice i indica si el parámetro se refiere a un arco transitado por subtes o trenes. Aparece aquí un parámetro nuevo, g_i , que es la frecuencia del servicio. Bajo el supuesto de que el lugar en la fila de espera para un individuo se distribuye de manera uniforme, la inversa de la frecuencia resulta ser entonces la esperanza del tiempo que debe aguardar entre servicios. Esta función de costos refleja la manera distinta en la que se congestionan estos medios: no importa cuánta gente transporten, siempre tardan lo mismo. Pero existe la posibilidad de que algunas personas deban esperar más de un servicio, pues quienes están antes en la cola colman su capacidad, y recién siguientes formaciones podrán realizar su viaje.

Nótese que en cualquier caso, las funciones de costos sobre los nodos cumplen con ser no negativas, no decrecientes (para valores de flujos no negativos) e integrables en cualquier intervalo $[0, a]$. En el primer caso las tres características son obvias; en el segundo, lo mismo sucede con las dos primeras. Pero como es una función discontinua, se debe observar que, en cualquier intervalo $[0, a]$, las discontinuidades son finitas y la función es allí acotada. Entonces, el teorema de Fubini establece que es integrable en ese intervalo cerrado. Esto ha permitido encontrar el equilibrio en la red modelada mediante la minimización planteada en la ecuación (4).

4.2) Cómputos

Dada la caracterización exógena completa de la red de Buenos Aires recién expuesta, se procedió a realizar el cómputo del vector de flujos de equilibrio de Wardrop de la misma. También se calculó el vector de flujos óptimo. A continuación se detalla el procedimiento, llevado a cabo a través de un programa que se adjunta como apéndice. El mismo fue escrito en el lenguaje C++, en su estándar C++11 y compilado usando MinGW, versión 4.6.2-1, en un C.P.U. de 4 Gb de RAM con un procesador Intel Core i3-2310M de 2.1 GHz. Dado que éste es un lenguaje orientado a objetos, se recomienda al lector referirse a las lecturas [5,6] en caso de interesarle detalles técnicos acerca de los métodos de programación utilizados.

En primer lugar, los vectores que caracterizan la red se introducen al programa como instancias de clases llamadas Nodos, Arcos y Demandas. Se creó una clase llamada Red, y una instancia suya que contiene como variables miembro los objetos recién mencionados. En este punto, toda la información exógena ya ha sido introducida en el programa, y desde aquí en adelante éste se encargará de obtener todos los resultados endógenos. Como primer acción, el constructor de la clase Red utiliza los elementos de los vectores de Arcos y Demandas y genera una instancia de la clase Rutas, que también será una variable miembro de la Red instanciada. La generación de las rutas se realiza mediante el siguiente algoritmo, cuyo pseudo-código es aquí escrito:

- _numerar todos los arcos de la red
- ordenar todos los arcos ya numerados
- _para cada permutación de los arcos:

```
{
  Si el origen del primer arco coincide con el origen de una demanda A
  {
    mientras no se hallan acabado los arcos de la permutación
    {
      _pasar al siguiente arco
      _si su origen coincide con el destino del arco anterior
      {
        _si su destino es el destino de alguna demanda B
        {
          _guardar los arcos hasta aquí recorridos como una
ruta entre A y B
        }
      }
    }
  }
}
```

Se deriva de este código que la variable rutas contiene, para cada demanda z , una instancia que refleja el vector de rutas R^z del marco teórico aludido. El constructor de la clase Red termina asignando un flujo cualquiera a cada ruta, para que su instanciación quede completa.

Una vez construida la red, la clase Red ofrece dos métodos, de los cuales uno consigue el vector de flujos óptimos de la misma y otro el vector de flujos de equilibrio. En ambos, el método Red::proyectar, que es llamado por los mismos, se asegura de que se cumplan las restricciones de consistencia de las ecuaciones (2) y (3). Además, resuelve la minimización restringida del problema (4) para obtener el equilibrio, y del (5) para obtener el óptimo. La minimización es realizada mediante el método de simplex de Nelder-Mead[3,4], el cual nos permite minimizar las funciones objetivos sin hacer uso del cálculo de gradientes. Hemos utilizado los parámetros estándar de $\alpha = 1$, $\gamma = 2$, $\beta = \frac{1}{2}$, $\varepsilon = 10^{-10}$. Para el lector acostumbrado al uso del entorno Matlab, es éste el mismo algoritmo que se utiliza en la función "fminsearch". Una vez computados ambos vectores, el método Red::costoEsq, devuelve el costo social de cada uno de los esquemas y lo guarda en la variable homónima.

La clase red provee los distintos manipuladores de sus variables que han permitido observar los valores de las mismas en cada caso. Por cuestiones de sencillez, ninguna de las clases construidas ha implementado un destructor distinto al que se establece por defecto. En la próxima sección se muestran los resultados.

5) Cómputo del modelo

5.1) Cómputo calibrado para reflejar la red circa 1.960 y 2.013

Aquí se muestran, en primer lugar, los cómputos de los modelos con la red calibrada para los años 1960 y 2013. Se han calculado el equilibrio y el óptimo, detallándose los resultados en la siguiente tabla:

	2.013	1.960
<i>Horas totales de viaje en el equilibrio de la red.</i>	863.954	563.780
<i>Horas totales de viaje en el óptimo de la red (como % del equilibrio)</i>	91%	96%
<i>Pérdida como % del salario mensual de un usuario.</i>	2,5%	<1%

Como se puede apreciar, en el equilibrio calibrado con datos de la actualidad la cantidad de horas utilizadas por la red total para viajar es mucho mayor que en el calibrado para año 1960, lo cual era de esperarse dado el crecimiento de las demandas de la red. Son las tercer y cuarta filas las que proveen de información que se puede comparar. Dada la calibración para el primero de los períodos analizados, resulta que el óptimo dista del equilibrio en un 4%; esto se entiende como que, dada la situación de equilibrio, tan solo un 4% del tiempo utilizado para viajar en este esquema es tiempo que se podría ahorrar. A fin de cuentas, resulta una manera de medir la ineficiencia si recurrir a términos absolutos, como puede ser la diferencia en horas totales viajadas en el óptimo y el equilibrio. Así, es posible comparar este 4% con el 9% que resulta del modelo calibrado con datos que reflejan el esquema alrededor del año 2.013. Las horas de viaje que se podrían evitar resultan un porcentaje mayor de las horas utilizadas en equilibrio. Si se comparan estas mediadas relativas de la ineficiencia dadas una y otra calibración, se obtiene el siguiente ratio:

$$\frac{1 - 0,91}{1 - 0,96} = 2,2$$

El modelo sugiere que la pérdida más que se duplicó entre estos períodos, produciendo un uso de horas dedicado al viaje en transporte público cuyo componente de tiempo evitable creció.

Por otro lado, se ha medido la pérdida media de tiempo de viaje individual en términos de lo que esas horas representan como salario que se ha dejado de percibir en ese tiempo. Como porcentaje del salario mensual, este costo se ha más que duplicado. Estas comparaciones entre los modelos calibrados con datos de distintos momentos del tiempo son una manera de cuantificar el empeoramiento del servicio identificado en los datos recopilados, y la consecuente pérdida de bienestar que éste significa.

5.2) Ejercicios de estática comparada

Se realizaron también ejercicios de estática comparada, cambiando algunos de los valores de los parámetros calibrados. Esto, para ver qué tipo de impacto se podrían inferir del modelo si variase el esquema actual de la red de transporte. Es un paso previo a cualquier análisis costo-beneficio que se realice para considerar cualquier inversión o regulación nueva en esta red.

Como primer ejercicio, se introduce un teorema que refleja el hecho de que, si la capacidad del sistema aumenta acorde a los aumentos de demanda, la utilización de los distintos servicios seguirá en la misma proporción. Esto es, la ineficiencia medida como

porcentaje de horas que se podrían ahorrar del equilibrio seguirá siendo la misma. Véase, pues este teorema:

Teorema 2: En la parametrización del modelo utilizada, dada una red W , un vector f^{**} y un vector f^* de equilibrio de ella, si se considera una red W' idéntica a la anterior, salvo que para cualquier función de costos su parámetro de capacidad es $K'_a = \delta K_a$, y todas sus demandas son $d'_i = \delta d_i$. Entonces el nuevo equilibrio es δf^* y el nuevo óptimo δf^{**}

Demostración:

Considerese el vector $\hat{f}^* = \delta f^*$, con el delta veces la cantidad de flujos sobre los arcos y sobre las rutas. Se cumplen las condiciones de consistencia ya que del equilibrio anterior se deduce que :

$$\begin{aligned} \sum_{r|ai \in r} f_r^* &= f_{ai}^* \forall i \Rightarrow \delta \sum_{r|ai \in r} f_r^* = \delta f_{ai}^* \forall i \Rightarrow \sum_{r|ai \in r} \hat{f}_r^* = \hat{f}_{ai}^* \forall i \\ \sum_{r \in R_Z} f_r^* &= d_z \forall Z \Rightarrow \delta \sum_{r \in R_Z} f_r^* = \delta d_z \forall Z \Rightarrow \sum_{r \in R_Z} \hat{f}_r^* = d'_z \forall Z \end{aligned}$$

Además, en la parametrización todas las funciones de costos se pueden re-escribir como $c(f) = c'(f/K)$, por lo que, viendo los costos anteriores sobre cada arco, se puede notar:

$$\begin{aligned} c'(f_{ai}^*/K_{ai}) &= c'(f_{aj}^*/K_{aj}) \forall i, j \Rightarrow c'(\delta f_{ai}^*/\delta K_{ai}) = c'(\delta f_{aj}^*/\delta K_{aj}) \forall i, j \\ &\Rightarrow c'\left(\frac{\hat{f}_{ai}^*}{K'_{ai}}\right) = c'\left(\frac{\hat{f}_{aj}^*}{K'_{aj}}\right) \forall i, j \end{aligned}$$

Entonces, como los costos sobre los arcos no varían, se sigue cumpliendo la igualdad de los costos sobre las rutas, pues se calcula como suma de ellos. Por lo tanto, el vector propuesto sigue cumpliendo con la condición de no arbitraje. Por teorema 1, es entonces el nuevo equilibrio.

Si f^{**} era el antiguo óptimo, se tiene que δf^{**} sigue cumpliendo las condiciones de consistencia, por el argumento recién expuesto. Además, cumple la nueva minimización, pues como:

$$\begin{aligned} f^{**} &= \arg \min_{f \in X_f} \sum_{t=1}^{t=m} c'(f_{ai}/K_{ai}) = \sum_{t=1}^{t=m} c'(\delta f_{ai}/\delta K_{ai}) \\ &\Rightarrow \delta f^{**} = \arg \min_{f \in X_f} \sum_{t=1}^{t=m} c'(f_{ai}/\delta K'_{ai}) \end{aligned}$$

Por lo tanto, δf^{**} es el nuevo óptimo.

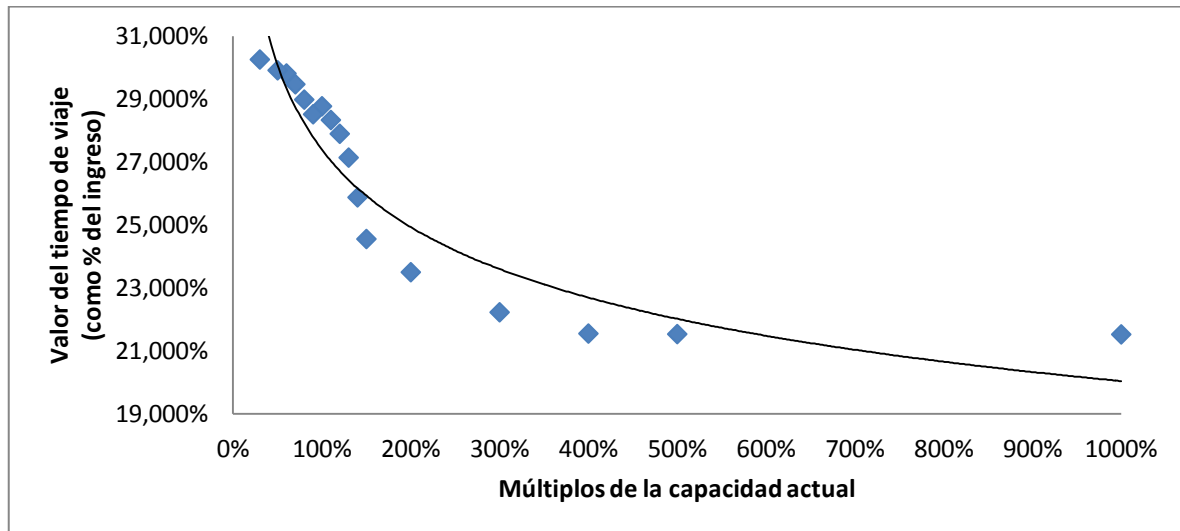
Quod erat demonstrandum

Así, con respecto a la medida de eficiencia utilizada, la inversión en capacidad tiene rendimientos constantes a escala, pues de lo recién expuesto se deduce que:

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=m} c_i(f_i^{**}/K_i)}{\sum_{i=1}^{i=m} c_i(f_i^*/K_i)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} c_i(\delta f_i^{**}/K'_i)}{\sum_{i=1}^{i=m} c_i(\delta f_i^*/K'_i)}$$

Por lo que la inversión en capacidad, si se limita a seguir el crecimiento de la demanda, meramente conserva la ineficiencia en el nivel previo. Para reducirla, la inversión en capacidad debe superar a la demanda.

Por el contrario, se podría realizar un ejercicio que mantiene la demanda constante pero se hace variar la capacidad de los distintos medios en una proporción dada. Se obtuvo, mediante distintas simulaciones, que el costo total de viaje, medido como porcentaje del ingreso de un individuo se mueve como lo muestra el siguiente gráfico:



Actualmente, el tiempo en viaje representa dentro del modelo un 30% del ingreso de un usuario promedio. Con sucesivas mejoras en la capacidad, éste se puede reducir hasta ser un 20%. Esto es, hay un margen de 10% del ingreso de un trabajador promedio que se puede ahorrar. En términos nominales, esto es alrededor de \$400 por mes. A tal efecto, sin embargo, habría que cuadruplicar la capacidad actual.

El segundo ejercicio que se realizó fue pensar qué sucedería con el equilibrio del año 2013 si se aumentara la velocidad promedio de viaje en tren en un 15%, o lo que es lo mismo, si se disminuyera su tiempo de viaje en esa proporción. El resultado que se obtuvo se presenta en la siguiente tabla, donde se reportan el equilibrio y el óptimo con las mismas medidas que en la tabla anterior.

Aumento de la Velocidad del Tren en un 15%	
Equilibrio	Óptimo
763.061	95%

Lo que se observa es que la cantidad de horas diarias que se utiliza para viajar en el equilibrio nuevo se reducía de 863.954 a 763.061. En este caso, el óptimo como porcentaje del equilibrio mejora de 91% a 95%, indicando que la mejora en el tiempo de los trenes llevaría a reducir parte de la ineficiencia generada en el sistema de transporte público. A fin de comparar el equilibrio resultante del ejercicio de estática comparada con el equilibrio original del año 2013, se ven cuántas horas se utilizarían para viajar en este nuevo esquema:

$$\frac{\text{Equilibrio Resultante}}{\text{Equilibrio Original 2013}} = \frac{763.061}{863.954} = 88\%$$

Este ratio me indica que el nuevo equilibrio ahorraría un 12% de las horas usadas en el equilibrio anterior; independientemente de cualquier consideración en la mejora o no

Evolución y Evaluación del Transporte Público en el Área de Buenos Aires: 1960-
2013. Congestión y deterioro

de la eficiencia en el esquema, éste ratio de por sí indica una mejora considerable. Dicho tipo de mejoras se pueden llevar a cabo sin renovar la planta vehicular actual, sino meramente dándole un mantenimiento adecuado.

El tercer y último ejercicio de estática comparada que se realizó fue el de disminuir la demanda en $\frac{3}{4}$ de su volumen original del año 2013. El resultado que se obtuvo se presenta en la siguiente tabla:

Reducción de $\frac{3}{4}$ de la demanda	
Equilibrio	Óptimo
162.412	99%

El equilibrio resultante es de 162.412 horas utilizadas por la red total para viajar por día. En este escenario, si se mide al óptimo como porcentaje del equilibrio el resultado es 99%, lo que muestra que la ineficiencia es prácticamente nula.

Dado que de 1.960 a la fecha la demanda aumentó en poco más de tres veces, este resultado da sustento teórico a la idea de que la ampliación de la red en tal período ha sido insuficiente. Con este ejercicio, se ve que la ampliación de la red de transporte (principalmente en colectivos), hubiese más que cubierto la demanda vieja, pero debido al gran crecimiento que se dio desde 1960 hasta la actualidad, no alcanza para abastecer toda la demanda nueva.

Finalmente, otra manera de presentar los resultados anteriormente mencionados es en términos de minutos por día por persona. El siguiente cuadro resume dicha información:

Simulación	Equilibrio	Óptimo
<i>Circa 2.013</i>	69	63
<i>Circa 1.960</i>	45	43
<i>Aumento de velocidad</i>	61	58
<i>Disminución de la demanda</i>	52	52

6) Otras distorsiones

Este estudio se centró en el transporte inter-urbano de pasajeros, y las distorsiones e ineficiencias que en él se observan. Pero la temática del transporte en el Área Metropolitana de Buenos Aires no se agota allí. En primer lugar, y resulta obvio, resta analizar el resto de la red de transporte público, esto es, los viajes urbanos y de corta distancia, y la ineficiencia allí producida. Pero además, hay otros tipos de distorsiones que se podrían considerar. La siguiente es una lista no exhaustiva de ellas.

6.1) Incentivos a usar el automóvil

El deterioro en el transporte público tiene como efecto colateral el desvío de tráfico al medio automotor privado, como ser automóviles y taxis. En estos medios, la externalidad generada por persona a través del congestionamiento es, a priori, considerablemente mayor, generándose mayores ineficiencias a medida que se muda de un transporte al otro. Más aún, estas externalidades impactan directamente sobre el servicio de transporte público mediante colectivos o Pre Metro. A continuación se expone una breve reseña sobre este efecto.

El gran crecimiento del tráfico en el área metropolitana ha afectado de manera bastante marcada y directa al servicio de transporte público automotor, al quedar éste atrapado en el tráfico provocando una disminución en la velocidad promedio del transporte. Como indicios de esta suba en el tráfico se puede notar, en primera instancia, el gran crecimiento del parque automotor en el área. Según la Dirección Nacional de Registros de Propiedad del Automotor, en 1.966 había en toda la Argentina un parque automotor de 1.708.635 unidades; mientras que en el año 2.009 era de 13.499.591 unidades, con 2.083.914 solamente en la Capital Federal. Un informe de la Cámara Argentina de Fabricantes de Componentes, estima más conservadoramente la flota circulante en 9.389.096 vehículos en Argentina, con 4.882.329 en el Área Metropolitana estudiada. De cualquiera de los dos informes se puede observar el crecimiento exponencial del tráfico en el área urbana.

Otro indicio del aumento de este tráfico es el crecimiento de automotores que circulan por las autopistas de la Capital Federal. Según datos del G.C.B.A. en el año 1.999 circulaban solamente por las autopistas de la ciudad unos 309.657.000 de vehículos al año, pero para el año 2.012 ya resultaban 479.603.000, es decir, un 55% de crecimiento en la circulación en solamente diez años.

Además, un 78,9% de las personas que utilizan el transporte colectivo provienen de hogares en donde no se posee ningún automóvil. Es este un indicio de que aquellas personas cuyo ingreso les permite optar entre sustituir el transporte colectivo por el privado han optado por hacerlo así.

6.2) El deterioro del transporte como un impuesto

A continuación se expone una de las consecuencias que pueden surgir debido a la presencia de un sistema de transporte público ineficiente. En particular, se discutirá acerca de cómo la ineficiencia que surge de este servicio puede ser vista como un impuesto con implicancias sobre la oferta laboral.

La idea central que se pretende mostrar es que una persona que debe viajar desde el conurbano bonaerense hacia el centro de la capital puede llegar a tardar, por ejemplo, tres horas debido a un servicio de transporte deficiente. De esta manera, el individuo termina cobrando un salario por un trabajo de 8 horas cuando en realidad el tiempo que le dedica a trabajar es de 11 horas. Esas 3 horas de más pueden considerarse un impuesto que aumenta cada vez más a medida que la ineficiencia es mayor. Además, ese tiempo extra que tarda en llegar al destino deseado son “recursos que se tiran al mar” dado que

es tiempo que el individuo no puede utilizar en realizar cualquier otra actividad mientras viaja.

Este hecho particular que se ha comentado puede tener grandes implicancias en la oferta laboral. Una de ellas es que puede inducir al individuo a aceptar un trabajo por un salario menor pero más cerca de su hogar y, de esta manera puede incrementarse el nivel de empleo en el sector informal dado que estas personas pasan a estar desconectadas de los lugares donde se asientan las empresas más productivas. Además, esta situación puede promover el desarrollo de barrios de emergencia cerca del centro de la ciudad como es el caso, por ejemplo, de la Villa 31.

Por último, se puede considerar que este impuesto que surge de la ineficiencia en el transporte afecta principalmente a las familias más carenciadas dado que, si bien existen muchas familias de ingresos altos que viven en las afueras de la capital (por ejemplo, en barrios privados), el problema de estos agentes tiene que ver más con sus preferencias. Es decir, para ellos la situación que enfrentan hace referencia a la elección de vivir en un departamento cerca del Microcentro pero de menor superficie o vivir en una casa grande con jardín pero afuera de Capital Federal. Las familias más carenciadas, por otro lado, no tienen oportunidad de decidir ya que su problema radica en que su restricción presupuestaria no alcanza para comprar un departamento más cerca de donde viven de manera que su única opción es vivir en el conurbano.

7) Comentarios finales

En este trabajo se analizó el servicio de transporte público en el Área Metropolitana de Buenos Aires haciendo enfoque en los viajes desde el Conurbano bonaerense hacia el centro de la capital. Para ello, se buscó comparar la ineficiencia (medida como desviación del óptimo) que existía en la década de 1960 con respecto a la que existe bajo el esquema actual y se puede ver que la misma se incrementó. Bajo la red que se ha definido en este informe, se ha visto que, en la actualidad, un individuo pierde el triple de tiempo viajando de lo que perdía décadas atrás. Estos resultados tienen implicancias relevantes en el crecimiento del país dado que el tiempo que un individuo pierde viajando representan recursos que no pueden ser aprovechados por nadie, es decir, representa una pérdida irrecuperable de bienestar. Es necesario remarcar, por otro lado, que esta ineficiencia solamente se debe por el hecho de que los individuos toman sus decisiones sin tener en cuenta la externalidad que generan sobre los demás por utilizar dicha red. Es por ello que, además, se realizaron distintos ejercicios de estática comparada que reflejan como puede llegar a reducirse dicha ineficiencia si se mejorara el servicio mediante inversiones que permitan mejorar la calidad del servicio. En todos los casos se mostró como podría verse incrementado el PBI debido a dichas inversiones. A su vez, se explicó cómo puede influir esta ineficiencia en el mercado laboral y de qué manera afecta esto a los individuos que sufren las consecuencias de este sistema y cada vez les es más difícil insertarse en el sector productivo de la economía, cosa que les permitiría obtener salarios más elevados. Dado todo lo expuesto en este trabajo, se considera a éste como un problema interesante para el análisis a la hora de implementar distintas políticas públicas dirigidas a promover el crecimiento del país y el bienestar de los individuos.

Referencias

- [1] M. J. BECKMANN, C. B. MCGUIRE, C. B. WINSTEN – “*Studies in the Economics of Transportation*”, Yale University Press, New Haven, CT, 1956.
- [2] CORREA, STIER MOSES – *Wardrop Equilibria*, to be published in *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. Edited by J. J. Cochran.
- [3] NELDER, MEAD - *A Simplex Method for Function Minimization*, *The Computer Journal*, vol. 7 pp. 308 - 313, 1965.
- [4] LAGARIAS, J.C., J. A. REEDS, M. H. WRIGHT, and P. E. WRIGHT - "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," *SIAM Journal of Optimization*, Vol. 9 Number 1, pp. 112-147, 1998.
- [5] ECKEL, B. - "Thinking in C++" MindView Inc., 2.003.
- [6] STROUSTRUP, B. - "The C++ programming Language" Addison - Westley, 1997.

Apéndice: el programa utilizado

/*

Archivo: main.cpp

Última modificación: 28/07/2013

Este código implementa una clase que simboliza una red en nuestro esquema de transporte.

De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.

*/

//Instrucciones del preprocesador

```
#include<iostream> //Nos permite dialogar
con la consola.
#include<vector> //Nos permite usar
vectores.
#include<string> //Nos facilita el uso de
cadenas de caracteres.
#include<cstdlib> //Traemos las herramientas
de C
```

//Importamos las clases que creamos para trabajar

```
#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\BuenosAiresSur.cpp>
#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\BuenosAiresNorte.cpp>
#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\BuenosAiresOeste.cpp>
```

```
using namespace std; //Usamos los metodos
estandar de las librerias importadas
```

```
int main(){
```

```
    Red redNueva = BuenosAiresSur::obtRedBsAs();
```

```
    redNueva.equilibrio();
```

```
    cout << "\n\nLA RED HA SIDO EQUILIBRADA\n\n";
```

```
    system("pause");
```

```
    redNueva.descrNods();
    system("pause");
```

```
    redNueva.descrArcos();
    system("pause");
```

```
    redNueva.descrDems();
    system("pause");
```

```
    redNueva.descrRuts();
```

```
system("pause");

redNueva.descrCostoTotal();
system("pause");

redNueva = BuenosAiresSur::obtRedBsAs();

redNueva.optimizar();

cout << "\n\nLA RED HA SIDO OPTIMIZADA\n\n";

system("pause");

redNueva.descrNods();
system("pause");

redNueva.descrArcos();
system("pause");

redNueva.descrDems();
system("pause");

redNueva.descrRuts();
system("pause");

redNueva.descrCostoTotal();
system("pause");

redNueva = BuenosAiresOeste::obtRedBsAs();

redNueva.equilibrio();

cout << "\n\nLA RED HA SIDO EQUILIBRADA\n\n";

system("pause");

redNueva.descrNods();
system("pause");

redNueva.descrArcos();
system("pause");

redNueva.descrDems();
system("pause");

redNueva.descrRuts();
system("pause");

redNueva.descrCostoTotal();
system("pause");
```

```
redNueva = BuenosAiresOeste::obtRedBsAs();

redNueva.optimizar();

cout << "\n\nLA RED HA SIDO OPTIMIZADA\n\n";

system("pause");

redNueva.descrNods();
system("pause");

redNueva.descrArcos();
system("pause");

redNueva.descrDems();
system("pause");

redNueva.descrRuts();
system("pause");

redNueva.descrCostoTotal();
system("pause");

redNueva = BuenosAiresNorte::obtRedBsAs();

redNueva.equilibrio();

cout << "\n\nLA RED HA SIDO EQUILIBRADA\n\n";

system("pause");

redNueva.descrNods();
system("pause");

redNueva.descrArcos();
system("pause");

redNueva.descrDems();
system("pause");

redNueva.descrRuts();
system("pause");

redNueva.descrCostoTotal();
system("pause");

redNueva = BuenosAiresNorte::obtRedBsAs();

redNueva.optimizar();
```

```
cout << "\n\nLA RED HA SIDO OPTIMIZADA\n\n\n";

system("pause");

redNueva.descrNods();
system("pause");

redNueva.descrArcos();
system("pause");

redNueva.descrDems();
system("pause");

redNueva.descrRuts();
system("pause");

redNueva.descrCostoTotal();
system("pause");

cout << "\n\n SI PRESIONA UNA TECLA FINALIZA EL PROGRAMA Y SE
CIERRA LA VENTANA\n\n";
system("pause");

// ;-) Fin de la rutina, devolvemos un estatus positivo
return 1;
}
```

```
/*
Archivo: Arco.cpp
Última modificación: 28/07/2.013
Este código implementa una clase que simboliza un arco en nuestro esquema de
transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/
```

```
//Instrucciones de preprocesador
#include<math.h> //Nos permite usar
ciertass herramientas matemáticas
#include<string> //Nos facilita el uso de
cadenas de caracteres.

using namespace std; //Accedemos a los métodos de C++

class Arco{
private:
    //Declaramos los parámetros de nuestro modelo
    double tCeroTren;
    double tCeroColec;
    double tCeroSub;

    double frecTren;
    double frecSubte;

    double eta;

    double congTren;
    double congSub;
    double congColec;

    char tipoArc; //Diferencia entre colectivos,
subtes, trenes,...

    double integralParteEntera(double x);
//Calcula la integral de la parte entera de un número, definida entre
0 y x
public:
    int origen; int destino; //Identifica los nodos que
conecta mediante su número

    double flujosArc; //Es el flujo de trafico que
circula por el
```

Evolución y Evaluación del Transporte Público en el Área de Buenos Aires: 1960-2013. Congestión y deterioro

```
double costoArco(); //Es la función de costo del arco.
double costoEqu(); //Es la función de costo individual del arco.

string medio() {if(tipoArc == 's') return "subte";
                else if(tipoArc == 'c') return "colectivo";
                else if(tipoArc == 't') return "tren";
                };

//Constructor declaracion e implementacion; no declararemos destructor
Arco(int o, int d,char tipo) {origen = o; destino = d; tipoArc = tipo; flujosArc =
0.0; //Datos
base 2013 /*
          tCeroTren
= 1.03;
          tCeroColec = 0.82;
          tCeroSub
= 0.18;
          congTren
= 693918.0;
          congSub
= 1518333.0;
          congColec
= 128731.0;
          frecTren =
1.0/17.7;
          frecSubte
= 1.0/2.5817;
          eta = 4.0;
          */
//Estatica
comparada: se reduce el t0 del tren en un 15.3%
          /*
          tCeroTren
= 1.03*(1-0.153);
          tCeroColec = 0.82;
          tCeroSub
= 0.18;
          congTren
= 693918.0;
          congSub
= 1518333.0;
          congColec
= 128731.0;
```


Evolución y Evaluación del Transporte Público en el Área de Buenos Aires: 1960-2013. Congestión y deterioro

```
1.0/17.7;
= 1.0/2.5817;

comparada: varían las capacidades

= 1.03;
    tCeroColec = 0.82;
= 0.18;
= 693918.0*(1+9.0);
= 1518333.0*(1+9.0);
= 128731.0*(1+9.0);
1.0/17.7;
= 1.0/2.5817;

1960

= 0.75;
    tCeroColec = 0.72;
= 0.38;
= 850530.0;
= 1115872.0;
= 19614.0;
1.0/14.95;
= 1.0/3.12;

//Copia los argumentos pasados, y el flujo inicial es cero
```

```
frecTren =
frecSubte
eta = 4.0;
*/
//Estatica

tCeroTren

tCeroSub
congTren
congSub
congColec

frecTren =
frecSubte
eta = 4.0;

//Datos
/*
tCeroTren

tCeroSub
congTren
congSub
congColec

frecTren =
frecSubte
eta = 4.0;
*/
}
```

```
};

double Arco::costoArco(){

    //Son las funciones de costo agregado de los arcos
    if(tipoArc == 't') return
((1.0/frecTren)*(double)floor(flujosArc/congTren)+tCeroTren)*flujosArc;
    else if(tipoArc == 'c') return
(1.0+pow((flujosArc/congColec),eta))*tCeroColec*flujosArc;
    else if(tipoArc == 's') return
((1.0/frecSubte)*(double)floor(flujosArc/congSub)+tCeroSub)*flujosArc;
}

double Arco::costoEqu(){
    //Son las integrales definidas que se minimizan para encontrar el
equilibrio
    if(tipoArc == 't') return
(1.0/frecTren)*integralParteEntera(flujosArc/congTren)+tCeroTren*flujosArc;
    else if(tipoArc == 'c') return
(flujosArc+(congColec/(eta+1.0))*pow((flujosArc/congColec),eta+1.0))*tCeroColec;
    else if(tipoArc == 's') return
(1.0/frecSubte)*integralParteEntera(flujosArc/congSub)+tCeroSub*flujosArc;
}

double Arco::integralParteEntera(double x){
    double integral = 0;
    integral = x + (double)floor(x)*(ceil(x)/2.0-1.0);
    return integral;
}
```

```
/*
Archivo: BuenosAiresSur.cpp
Última modificación: 28/07/2.013
Este código implementa una clase que simboliza una Red del Sur de Buenos Aires
en nuestro esquema de transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/

#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\Red.cpp>

class BuenosAiresSur{

public:
    static Red obtRedBsAs();
};

Red BuenosAiresSur::obtRedBsAs(){

vector< Nodo> nodosAPasar;

    Nodo nodoTemporal = Nodo("NOTOCAR");    //NO TOCAR

    nodoTemporal = Nodo("Alejandro_Korn");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Constitución");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Centro");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Berazategui");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

vector< Demanda> demandasAPasar;

    Demanda demandaTemp = Demanda(0,0,0);    //NO TOCAR

    demandaTemp = Demanda(0,2,114450);//14);    //(Sur)Korn-Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);

    demandaTemp = Demanda(3,2,135511);//14);    //(Sureste)La Plata-Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
/*
//DEMANDAS 1960
    demandaTemp = Demanda(0,2,76980);//14);    //(Sur)Korn-Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);

    demandaTemp = Demanda(3,2,82418);//14);    //(Sureste)La Plata-Centro
```

```
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
*/

    vector< Arco> arcosAPasar;

    Arco arcoTemp = Arco(0,0,'t');    //NO TOCAR

    arcoTemp = Arco(0,1,'t');    //Alejandro Korn-Constitución 7
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(0,2,'c');    //Alejandro Korn-Centro 8
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(1,2,'s');    //Constitución-Centro 9
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(3,1,'t');    //Berazategui - Constitucion 9
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(3,2,'c');    //Berazategui-Centro 9
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    Red redBsAs = Red(arcosAPasar,nodosAPasar,demandasAPasar,"Buenos
Aires Sur");

    return redBsAs;

}
```

```
/*
Archivo: BuenosAiresOeste.cpp
Última modificación: 28/07/2.013
Este código implementa una clase que simboliza una Red del Oeste de Buenos
Aires en nuestro esquema de transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/
class BuenosAiresOeste{

    public:
        static Red obtRedBsAs();
};

Red BuenosAiresOeste::obtRedBsAs(){

    vector< Nodo> nodosAPasar;

    Nodo nodoTemporal = Nodo("NOTOCAR");    //NO TOCAR

    nodoTemporal = Nodo("Moreno");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Once");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Gonzalez_Catán");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Plaza_de_los_Virreyes");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Centro");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    vector< Demanda> demandasAPasar;

    Demanda demandaTemp = Demanda(0,0,0);    //NO TOCAR

    demandaTemp = Demanda(0,4,168161);//19);    //(Oeste)Moreno-Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);

    demandaTemp = Demanda(2,4,41481);//12);    //(Sudoeste)González Catán-
Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
}
/*
//DEMANDAS 1960
demandaTemp = Demanda(0,4,117879);    //(Oeste)Moreno-Centro
demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
*/
```

```
    demandaTemp = Demanda(2,4,17202);    //(Sudoeste)González Catán-
Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
*/

    vector< Arco> arcosAPasar;

    Arco arcoTemp = Arco(0,0,'t');    //NO TOCAR

    arcoTemp = Arco(0,1,'t');    //(Oeste)Moreno-Once 0
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(0,4,'c');    //(Oeste)Moreno-Centro 2
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(0,3,'t');    //(Oeste)Merlo-Virreyes 2
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(1,4,'s');    //Once-Centro 3
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(2,3,'t');    //González Catán-Plaza de los Virreyes 4
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(2,4,'c');    //González Catán-Centro 5
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(3,4,'s');    //Plaza de los Virreyes-Centro 6
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);
    Red redBsAs = Red(arcosAPasar,nodosAPasar,demandasAPasar,"Buenos
Aires Oeste");

    return redBsAs;

}
```

```
/*
Archivo: BuenosAiresNorte.cpp
Última modificación: 28/07/2.013
Este código implementa una clase que simboliza una Red del Norte de Buenos
Aires en nuestro esquema de transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/
class BuenosAiresNorte{

public:
    static Red obtRedBsAs();
};

Red BuenosAiresNorte::obtRedBsAs(){

vector< Nodo> nodosAPasar;

    Nodo nodoTemporal = Nodo("NOTOCAR");    //NO TOCAR

    nodoTemporal = Nodo("Federico_Lacroze");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Centro");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Retiro");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Norte");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

    nodoTemporal = Nodo("Noroeste");
    nodosAPasar.push_back(nodoTemporal);

vector< Demanda> demandasAPasar;

    Demanda demandaTemp =Demanda(0,0,0);    //NO TOCAR

    demandaTemp = Demanda(3,1,189349); //29;        // Norte-Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);

    demandaTemp = Demanda(4,1,101934); //26;        //Noroeste-Centro
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
/*
//DEMANDAS 1960
    demandaTemp = Demanda(3,1,134124);
    demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
*/
```

```
demandaTemp = Demanda(4,1,70316);
demandasAPasar.push_back(demandaTemp);
*/
vector< Arco> arcosAPasar;

Arco arcoTemp = Arco(0,0,'t');    //NO TOCAR

    arcoTemp = Arco(3,1,'c');        //Norte-Centro 0
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(3,2,'t');        //(Norte)Villa Rosa-Retiro 1
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(3,2,'t');        //(Norte)Tigre-Retiro 2
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(4,2,'t');        //(Noroeste)Pilar-Retiro 3
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(2,1,'s');        //Retiro-Centro 4
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(0,1,'s');        //Lacroze-Centro 5
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(4,0,'t');        //(Noroeste)Lemos-Lacroze 6
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    arcoTemp = Arco(4,1,'c');        //(Noroeste)- Centro
    arcosAPasar.push_back(arcoTemp);

    Red redBsAs = Red(arcosAPasar,nodosAPasar,demandasAPasar,"Buenos
Aires Norte");

    return redBsAs;

}
```



```
/*
Archivo: Demanda.cpp
Última modificación: 28/07/2013
Este código implementa una clase que simboliza una demanda en nuestro esquema
de transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/
class Demanda{

    private:

    public:
        int origen;           //Donde se origina la demanda
        int destino;         //Donde requiere moverse
        double demanda;      //Cuánto es lo que precisa
mover

        //Constructor declaracion e implementacion; no declararemos destructor
        Demanda(int o, int d, double f) {origen = o; destino = d; demanda = f;}
//Copia los argumentos pasados, y el flujo inicial es cero
                                                                    /*{origen
= o; destino = d; demanda = 0.25*f;}*/ //Estática comparada, se reduce la demanda a un
cuarto de esta.
};
```

```
/*
Archivo: Red.cpp
Última modificación: 28/07/2.013
Este código implementa una clase que simboliza una Red en nuestro esquema de
transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/
//Instrucciones del preprocesador
#include<vector> //Nos permite usar
vectores
#include<iostream> //Nos permite dialogar
con la consola.
#include<string> //Nos facilita el uso de
cadenas de caracteres.
#include<algorithm>

//Importamos las clases que creamos para trabajar

#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\Demanda.cpp>
#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\Rutas.cpp>

using namespace std; //Usamos los metodos
estandar de C++

class Red{

private:

vector< Arco> arcos; //Los arcos de la red.
vector< Nodo> nodos; //Los nodos de la red.
vector< Demanda> demandas; //Las demandas de
la red.
vector< Rutas> rutas; //Las rutas para cada
demanda-

double costoEsq; //Es el costo del esquema
actual de la red.
double costoRed(); //Calcula el costo de la red
con la actual composición
double costoEquil(); //El propósito de
esta función es poder pasársela al optimizador.

void proyectar(); //Proyecta el flujo de las
rutas sobre los arcos.

double optAux(vector<double>); //El
propósito de esta función es poder pasársela al optimizador.
```

```
double equAux(vector<double>); //El
propósito de esta función es poder pasársela al optimizador.

//Nuestra optimización es Nelder-Mead
//Declaramos primero sus parámetros.

double alfa;
double beta;
double epsilon;
double gama;

string nombre; //El nombre de la red.
public:
void descrDems(); //Describe las demandas
void descrNods(); //Describe los nodos
void descrRuts(); //Describe las rutas
void descrArcos(); //Describe los arcos
void descrCostoTotal(); //Describe el costo total
de la red.
void optimizar(); //Esta es la función que, en
realidad, terminaremos usando para optimizar.
void equilibrio(); //Esta es la función que, en
realidad, terminaremos usando para optimizar.

//Constructor declaracion; no declararemos destructor
Red(vector< Arco> arcos, vector< Nodo> nods, vector< Demanda> dems,
string nom);
};

//Constructor implementación
Red::Red(vector< Arco> arcos, vector< Nodo> nods, vector< Demanda> dems,
string nom)
{arcos = arcos; nodos = nods; nombre = nom; demandas = dems;
//Arma la red con las descripciones pasadas.

//Declara los parámetros estándar de Nelder-Mead
alfa = 1.0;
beta = 0.5;
epsilon = pow(10.0,-10.0);
gama = 2.0;

//Generaremos las rutas para cada demanda.
//El proceso es sencillo si es comentado paso a paso.
for(int i = 0; i < demandas.size(); i++){
//Primero, declaramos que las rutas van a ser construidas en un
almacenamiento temporal y de allí pasará al permanente
vector <vector <int> > rutasTemp;

//Dados todos los arcos de nuestra red, los numeramos.
```

```
vector<int> Perm (arcos.size(),0);
for(int j = 0; j < Perm.size(); j++){
    Perm[j] += j;
}
//Todas las permutaciones de ellos son todos los posibles
caminos, que probaremos si son o no parte de nuestra ruta.
//De nuevo, cada ruta empieza en un compartimiento temporal,
que luego pasaremos al final.
vector< int> caminoTemp;
do{
    //Estamos buscando caminos entre el origen y el destino de
nuestra demanda seleccionada.
    int origT = demandas[i].origen;
    int destT = demandas[i].destino;

    caminoTemp.clear();          //Empezamos un camino
nuevo.

    //Recorremos la permutación
for(int k = 0; k < Perm.size(); k++){
    //Si el arco actual comienza en nuestra actual posición, el
proceso sigue (1)
        if(arcos[Perm[k]].origen == origT){
            //Agregamos este arco a
nuestro camino.
            caminoTemp.push_back(Perm[k]);
            //En el próximo paso, el origen
será a donde nos llevó este arco.
            origT = arcos[Perm[k]].destino;
            if( origT == destT){ //Si este
camino nos llevó ya al destino
            //Chequeamos primero que no
lo hayamos anotado antes
                bool rep = false;
                for(int m = 0; m <
rutasTemp.size(); m++){
                    if(rutasTemp[m] ==
caminoTemp) { rep = true; break;}
                }
            //Y si no es una repetición, lo
tomamos como válido.
            if(!rep){
                break;
            }
        }
        else{break;}          // (1) Y si no estaba allí,
damos por errónea esta ruta.
    }
}while(next_permutation( Perm.begin(),Perm.end() ) );
```

```

        //Pasamos nuestras rutas a la ubicación permanente.
        Rutas rT = Rutas(demandas[i].origen, demandas[i].destino,
rutasTemp);
        rutas.push_back(rT);
    }
    //Antes de resolver nada, asignamos el flujo de cada demanda a la
    primera de sus rutas,
    //es una elección totalmente arbitraria que solo nos sirve para que el
    constructor esté completo.

    for(int i = 0; i < demandas.size(); i++){
        rutas[i].flujosRut = vector<double> (rutas[i].recorridos.size(),0);
        rutas[i].flujosRut[0] = demandas[i].demanda;
    }

    //Cada vez que reasignamos rutas, proyectamos sus flujos
    proyectar();
    //Y calculamos cuál es el costo de la red con este esquema.
    costoEsq = costoRed();

}

//Implementamos la proyección
void Red::proyectar(){
    //Llevamos el flujo de todos los arcos a cero
    for(int m = 0; m < arcos.size(); m++)
        { arcos[m].flujosArc = 0;}
    //Proyectaremos de a una ruta por vez
    for(int i = 0; i < rutas.size(); i++){
        //Y en cada ruta, proyectaremos de a un recorrido por vez.
        for(int j = 0; j < rutas[i].recorridos.size(); j++){
            //Asignamos cada parte del recorrido segun corresponde
            for(int k = 0; k < rutas[i].recorridos[j].size(); k++)
                { arcos[rutas[i].recorridos[j][k]].flujosArc += rutas[i].flujosRut[j];}
        }
    }
}

//Implementamos el cálculo de costos
double Red::costoRed(){
    double costoTotal = 0;
    //Computamos el costo en base a los arcos
    for(int i = 0; i < arcos.size(); i++){
        costoTotal += arcos[i].costoArco();
    }
    return costoTotal;
}

//Implementamos el cálculo de costos de equilibrio
```

```
double Red::costoEquil(){
    double costoTotal = 0;
    //Computamos el costo en base a los arcos
    for(int i = 0; i < arcos.size(); i++){
        costoTotal += arcos[i].costoEqu();
    }
    return costoTotal;
}

//Implementamos la función auxiliar para el optimizador
double Red::optAux(vector< double> params){
    //Los parámetros no son otra cosa mas que los flujos de las rutas, los pasamos
    con la restricción de demanda
    int k = 0; //Va a iterar sobre los
    parámetros pasados hasta ese momento.
    for(int i = 0; i < rutas.size(); i++){
        rutas[i].flujosRut[0] = demandas[i].demanda; //La primera de
        las rutas será construida como resto de las demás
        for(int j = 1; j < rutas[i].flujosRut.size(); j++){
            if(params[k] < -0.0001) {return pow(10,10);} //Descartamos la
            posibilidad de rutas con flujo negativo...
            rutas[i].flujosRut[0] -= params[k];
            rutas[i].flujosRut[j] = params[k++];
        }
        if(rutas[i].flujosRut[0] < -0.0001) {return pow(5,10);}
    }
    proyectar();
    costoEsq = costoRed();
    return costoEsq;
}

//Implementamos la función auxiliar para el optimizador
double Red::equAux(vector< double> params){
    //Los parámetros no son otra cosa mas que los flujos de las rutas, los pasamos
    con la restricción de demanda
    int k = 0; //Va a iterar sobre los
    parámetros pasados hasta ese momento.
    for(int i = 0; i < rutas.size(); i++){
        rutas[i].flujosRut[0] = demandas[i].demanda; //La primera de
        las rutas será construida como resto de las demás
        for(int j = 1; j < rutas[i].flujosRut.size(); j++){
            if(params[k] < -0.0001) {return pow(10,10);} //Descartamos la
            posibilidad de rutas con flujo negativo...
            rutas[i].flujosRut[0] -= params[k];
            rutas[i].flujosRut[j] = params[k++];
        }
        if(rutas[i].flujosRut[0] < -0.0001) {return pow(5,10);}
    }
    proyectar();
    costoEsq = costoRed();
}
```

```
    return costoEquil();
}

//Resolvemos el problema de minimización que nos dará el óptimo social
void Red::optimizar(){

    int iterac = 0;

    vector< double> inicial; //Serán los parámetros
que finalmente pasemos.
    for(int i = 0; i < rutas.size(); i++){
        for(int j = 1; j < rutas[i].flujosRut.size(); j++){
            inicial.push_back(rutas[i].flujosRut[j]);
        }
    }

    //Luego implementamos el optimizador.

    int n = inicial.size();
    vector< vector<double> > simplex (n + 1, vector<double> (n) );
    for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
        for(int j = 0; j < i; j++){
            simplex[i][j] = inicial[j];
        }
        for(int j= i; j < n; j++){
            simplex[i][j] = inicial[j] + 1.0;
        }
    }

    //Se evalúa la función en cada punto
    vector<double> valores (n + 1);
    for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
        valores[i] = optAux(simplex[i]);
    }

    //Comienza el ciclo
    while(1){
        cout << "\nIterac: " << iterac++ << " costo: " << costoEsq << "\n";

        //Busca el máximo y el mínimo
        int max = 0; int min = 0;

        for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
            if(valores[max] < valores[i]) max = i;
            if(valores[min] > valores[i]) min = i;
        }

        //Construye el centroide
```

```
vector<double> centroide (n);
for(int i = 0; i < n; i++){
    centroide[i] = 0;
    for(int j = 0; j < (n + 1); j++){ if(j != max) centroide[i] += simplex[j][i];}
    centroide[i] /= (double) n;
}

//Construye la reflexión y el valor en ella

vector<double> reflex (n);
for(int i = 0; i < n; i++){ reflex[i] = (1.0 + alfa) * centroide[i] - alfa *
simplex[max][i];}

double vRef = optAux(reflex);

//Si el valor de la funcion reflejada es menor al mejor punto del simplex...
if(vRef < valores[min]){
//...expando.
    vector<double> expan (n);
    for(int i = 0; i < n; i++){ expan[i] = gama * reflex[i] + (1.0 - gama) *
centroide[i];}

    double vExpan = optAux(expan);

//Si la expansión es satisfactoria, me quedo con ella en reemplazo del
peor punto.

    if(vExpan < valores[min]) {simplex[max] = expan; valores[max] =
vExpan;}

//Si no lo es, lo reemplazo por la reflexión

    else {simplex[max] = reflex; valores[max] = vRef;}
}

//Pero si la reflexión no es menor al mejor punto...

else{
//Primero, me fijo si no es mejor que alguno de los puntos.
    bool mejor = false;
    for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
        if( i != max && vRef < valores[i]) {mejor = true; break;}
    }

//Si lo es, reemplazo el peor por la reflexión

    if(mejor) {simplex[max] = reflex; valores[max] = vRef;}

//Sino
    else{
```



```
//Primero, veo si la reflexión es mejor al peor punto. Si es así, lo
reemplazo.
    if(vRef <= valores[max]) {simplex[max] = reflex; valores[max] =
vRef;}

//Luego, construyo mi contracción y busco el valor allí
vector<double> contrac (n);
for(int i = 0; i < n; i++){ contrac[i] = beta * simplex[max][i] + (1.0-
beta) * centroide[i];}
double vContrac = optAux(contrac);

//Si al contraer empeora, "acerco" el simplex al mejor punto.
if(vContrac > valores[max]){
    for(int j = 0; j < (n + 1); j++){
        for(int i = 0; i < n; i++){
            simplex[j][i] = simplex[j][i] + simplex[min][i];
            simplex[j][i] /= 2.0;
        }
        valores[j] = optAux(simplex[j]);
    }
}
//Si no es tal el caso, reemplazo el peor punto por la contracción
else {simplex[max] = contrac; valores[max] = vContrac;}
}
}

//Armo el centroide DEL SIMPLEX para calcular el error medio (es
distinto al anterior)
for(int i = 0; i < n; i++){
    centroide[i] = 0;
    for(int j = 0; j < (n + 1); j++){ centroide[i] += simplex[j][i]; }
    centroide[i] /= (n + 1.0);
}
double vCent = optAux(centroide);

//Busco el error medio

double error = 0;

for(int i = 0; i < (n + 1) ; i++) error += pow((valores[i] - vCent),2.0);

error /= (n + 1.0);

error = sqrt(error);

//Si resulta menor al epsilon fijado, termina el proceso y devuelvo el
menor punto hallado
if(error < epsilon){
```

```
        min = 0;
        for(int i = 0; i < (n + 1); i++){if(valores[i] < valores[min]) min = i;}

        optAux(simplex[min]);

        break;
    }
}
```

//Asi resolvemos el problema de minimización que nos dará el equilibrio
void Red::equilibrio(){

```
    int iterac = 0;

    vector< double> inicial; //Serán los parámetros
que finalmente pasemos.
    for(int i = 0; i < rutas.size(); i++){
        for(int j = 1; j < rutas[i].flujosRut.size(); j++){
            inicial.push_back(rutas[i].flujosRut[j]);
        }
    }
    //Nuestra optimización es Nelder-Mead

    //Luego implementamos el optimizador.

    int n = inicial.size();
    vector< vector<double> > simplex (n + 1, vector<double> (n) );
    for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
        for(int j = 0; j < i; j++){
            simplex[i][j] = inicial[j];
        }
        for(int j= i; j < n; j++){
            simplex[i][j] = inicial[j] + 1.0;
        }
    }

    //Se evalúa la función en cada punto
    vector<double> valores (n + 1);
    for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
        valores[i] = equAux(simplex[i]);
    }

    //Comienza el ciclo
    while(1){
        cout << "\nIterac: " << iterac++ << " costo: " << costoEsq << "\n";

        //Busca el máximo y el mínimo
```

```
int max = 0; int min = 0;

for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
    if(valores[max] < valores[i]) max = i;
    if(valores[min] > valores[i]) min = i;
}

//Construye el centroide

vector<double> centroide (n);
for(int i = 0; i < n; i++){
    centroide[i] = 0;
    for(int j = 0; j < (n + 1); j++){ if(j != max) centroide[i] += simplex[j][i];}
    centroide[i] /= (double) n;
}

//Construye la reflexión y el valor en ella

vector<double> reflex (n);
for(int i = 0; i < n; i++){ reflex[i] = (1.0 + alfa) * centroide[i] - alfa *
simplex[max][i];}

double vRef = equAux(reflex);

//Si el valor de la funcion reflejada es menor al mejor punto del simplex...
if(vRef < valores[min]){
//...expando.
vector<double> expan (n);
for(int i = 0; i < n; i++){ expan[i] = gama * reflex[i] + (1.0 - gama) *
centroide[i];}

double vExpan = equAux(expan);

//Si la expansión es satisfactoria, me quedo con ella en reemplazo del
peor punto.

if(vExpan < valores[min]) {simplex[max] = expan; valores[max] =
vExpan;}

//Si no lo es, lo reemplazo por la reflexión

else {simplex[max] = reflex; valores[max] = vRef;}
}

//Pero si la reflexión no es menor al mejor punto...

else{
//Primero, me fijo si no es mejor que alguno de los puntos.
bool mejor = false;
for(int i = 0; i < (n + 1); i++){
    if( i != max && vRef < valores[i]) {mejor = true; break;}
}
```

```
    }

    //Si lo es, reemplazo el peor por la reflexión

    if(mejor) {simplex[max] = reflex; valores[max] = vRef;}

    //Sino
    else{
    //Primero, veo si la reflexión es mejor al peor punto. Si es así, lo
reemplazo.
        if(vRef <= valores[max]) {simplex[max] = reflex; valores[max] =
vRef;}

        //Luego, construyo mi contracción y busco el valor allí
        vector<double> contrac (n);
        for(int i = 0; i < n; i++){ contrac[i] = beta * simplex[max][i] + (1.0-
beta) * centroide[i];}
        double vContrac = equAux(contrac);

        //Si al contraer empeora, "acerco" el simplex al mejor punto.
        if(vContrac > valores[max]){
            for(int j = 0; j < (n + 1); j++){
                for(int i = 0; i < n; i++){
                    simplex[j][i] = simplex[j][i] + simplex[min][i];
                    simplex[j][i] /= 2.0;
                }
                valores[j] = equAux(simplex[j]);
            }
        }
        //Si no es tal el caso, reemplazo el peor punto por la contracción
        else {simplex[max] = contrac; valores[max] = vContrac;}

    }
}

//Armo el centroide DEL SIMPLEX para calcular el error medio (es
distinto al anterior)

for(int i = 0; i < n; i++){
    centroide[i] = 0;
    for(int j = 0; j < (n + 1); j++){ centroide[i] += simplex[j][i]; }
    centroide[i] /= (n + 1.0);
}
double vCent = equAux(centroide);

//Busco el error medio

double error = 0;

for(int i = 0; i < (n + 1) ; i++) error += pow((valores[i] - vCent),2.0);
```

```
error /= (n + 1.0);

error = sqrt(error);

//Si resulta menor al epsilon fijado, termina el proceso y devuelvo el
menor punto hallado
if(error < epsilon){
    min = 0;
    for(int i = 0; i < (n + 1); i++){if(valores[i] < valores[min]) min = i;}

    optAux(simplex[min]);

    break;
}
}

//Estas funciones simplemente nos dan la información de la red.
void Red::descrNods(){
    cout << "\nLa red " << nombre << " se tiene estos nodos:\n";
    for(int i = 0; i < nodos.size(); i++){
        cout << "El nodo numero " << i << " se corresponde con ";
        cout << nodos[i].nombre << "\n";
    }
}

void Red::descrArcos(){
    cout << "\nLa red " << nombre << " tiene esta estructura de arcos:\n";
    for(int i = 0; i < arcos.size(); i++){
        cout << "\nSobre el arco " << i << " que hace el tramo\n";
        cout << nodos[arcos[i].origen].nombre << " - " <<
        nodos[arcos[i].destino].nombre << " en " << arcos[i].medio();
        cout << "\ncirculan " << arcos[i].flujosArc << " pasajeros.\n";
    }
}

void Red::descrDems(){
    cout << "\nLa red " << nombre << " tiene estas demandas:\n";
    for(int i = 0; i < demandas.size(); i++){
        cout << "\nLa demanda entre " <<
        nodos[demandas[i].origen].nombre;
        cout << " y " << nodos[demandas[i].destino].nombre;
        cout << ", que es de " << demandas[i].demanda << "
        personas.\n";
    }
}

void Red::descrRuts(){
    cout << "\nLa red " << nombre << " tiene estos recorridos:\n";
```

```
        for(int i = 0; i < rutas.size(); i++){
            cout << "\nLas rutas entre " <<
nodos[demandas[i].origen].nombre;
            cout << " y " <<nodos[demandas[i].destino].nombre;
            cout << ", son:\n";
            cout << "Partiendo desde " <<
nodos[demandas[i].origen].nombre << ",\n";

            for(int k = 0; k < rutas[i].recorridos.size(); k++){
                cout << "La ruta " << k << " hace este recorrido:\n";
                for(int j = 0; j < rutas[i].recorridos[k].size(); j++){
                    cout << "\n_"
<<nodos[arcos[rutas[i].recorridos[k][j]].destino].nombre << ", tramo realizado en " <<
arcos[rutas[i].recorridos[k][j]].medio();
                    cout << "\n Por ella circulan " << rutas[i].flujosRut[k] << "
pasajeros.\n";

                    cout << "\n";
                }
            }
            cout << "\n";
        }

void Red::descrCostoTotal(){
    cout << "\nEl esquema de la red " << nombre << " representa un costo de: " <<
costoEsq << "\n";
}/*
Archivo: Rutas.cpp
Última modificación: 28/07/2.013
Este código implementa una clase que simboliza un vector de rutas en nuestro
esquema de transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/
//Instrucciones del preprocesador
#include<vector> //Nos permite usar
vectores

//Importamos las clases que creamos para trabajar

#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\Arco.cpp>
#include<C:\Users\Jesus\Documents\ProgramaTesis\Nodo.cpp>

class Rutas{

public:
    int origen; int destino; //El origen y el destino de
las rutas.

    vector<double> flujosRut; //El flujo que circula por
la ruta.
```

```
vector< vector <int> > recorridos; //Definira los distintas
rutas.
Rutas(int o, int d, vector< vector <int> > aR) //Construiremos
rutas para una demanda dada.
{origen = o; destino = d; recorridos = aR;}
};
```



```
/*
Archivo: Nodo.cpp
Última modificación: 28/07/2.013
Este código implementa una clase que simboliza un nodo en nuestro esquema de
transporte.
De la tesis 2.013 de Antuña Cepellotti, Jenik, Santaella y Vernhes.
*/
//Instrucciones de preprocesador
#include<string> //Nos facilita el uso de
cadenas de caracteres.

using namespace std; //Accedemos a los métodos de C++

class Nodo{

private:

public:
    double costo(double trafico); //Consideramos que
algunos nodos pueden tener un costo asociado al paso por él.
    string nombre; //Provee la posibilidad de
llamarlo por un nombre coloquial.

    //Constructor declaracion e implementacion; no declararemos destructor
    Nodo(string id) {nombre = id;} //Se limita a copiar los
argumentos pasados
};
```