



TESIS DOCTORAL

MODELOS BAYESIANOS DE PREDICCIÓN Y GESTIÓN DE TRÁFICO

EFRAÍN MARCELO PILAMUNGA POVEDA

Directores: Javier Martínez Moguerza

David Ríos Insua

José María Lavín

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Octubre de 2015



Don Javier Martínez Moguerza, Profesor Titular del Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa de la Universidad Rey Juan Carlos

AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada

MODELOS BAYESIANOS DE PREDICCIÓN Y GESTIÓN DE TRÁFICO

Realizada por **Don Efraín Marcelo Pilamunga Poveda** bajo su inmediata dirección y supervisión en el Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Rey Juan Carlos.

En Fuenlabrada, a octubre de 2015.

Fdo.: Javier Martínez Moguerza



Don David Ríos Insua, AXA-ICMAT Chair in Adversarial Risk Analysis en el Instituto de Ciencias Matemáticas del CSIC.

AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada

MODELOS BAYESIANOS DE PREDICCIÓN Y GESTIÓN DE TRÁFICO

Realizada por **Don Efraín Marcelo Pilamunga Poveda** bajo su inmediata dirección y supervisión en el Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Rey Juan Carlos.

En Fuenlabrada, a octubre de 2015.

Fdo.: David Ríos Insua



Don José María Lavín de la Cavada, Profesor de la Universidad Técnica de Ambato.

AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada

MODELOS BAYESIANOS DE PREDICCIÓN Y GESTIÓN DE TRÁFICO

Realizada por **Don Efraín Marcelo Pilamunga Poveda** bajo su inmediata dirección y supervisión en la Universidad Técnica de Ambato.

En Fuenlabrada, a octubre de 2015.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'José María Lavín', escrita sobre una línea horizontal.

Fdo.: José María Lavín



Don Enrique Cabello, como Director del Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa de la Universidad Rey Juan Carlos

INFORMA:

Que la presentación de la Tesis Doctoral titulada

MODELOS BAYESIANOS DE PREDICCIÓN Y GESTIÓN DE TRÁFICO

Ha sido realizada por **Don Efraín Marcelo Pilamunga Poveda** bajo la dirección y supervisión de Don Javier Martínez Moguerza, Don David Ríos Insua y Don José María Lavín de la Cavada y que el Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa de la Universidad Rey Juan Carlos ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Fuenlabrada, a octubre de 2015.

Fdo.: Enrique Cabello

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Luz Poveda, que me dio la vida, a quien agradezco infinitamente por su amor, cariño y comprensión, que ha estado conmigo en todo momento brindándome apoyo en mi vida personal y profesional, por ser mi motor y mi mejor ejemplo de lucha y superación.

A Javier M. Moguerza, como director de tesis. Con tu ayuda he logrado la consecución de esta tesis, gracias por las guías y correcciones que has hecho en este trabajo de investigación.

A David Ríos Insua, uno de los pilares fundamentales de mi trabajo. Gracias por el interés, por la ayuda, por la paciencia, por tus valiosas enseñanzas, por la amistad y la confianza.

A José María Lavin, por tu ayuda en la redacción de esta tesis, por los consejos, por la amistad y el apoyo brindado para concluirla.

A los tres, como equipo director de mi tesis, expreso sinceramente: “Ha sido un honor trabajar con uds.”

A Aracelly, por el apoyo infinito e incondicional hasta llegar aquí, sólo puedo decir mil gracias por todo.

A mi familia y aquellas personas que sin ser familiares, han sido mi soporte y compañía, y que han estado presentes de una u otra manera durante todo el periodo de estudio.

A mis compañeros de estudio y trabajo Dani, Julio, Milton, Fabián y Judith que siempre tuvieron una palabra de apoyo para mí o un consejo.

A la Universidad Técnica de Ambato, por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado.

Al Gobierno Autónomo Descentralizado – Municipalidad de Ambato (GAD-MA) por facilitar información de los flujos vehiculares del casco urbano de la ciudad.

ÍNDICE

Resumen	xv
Abstract.....	xvii
CAPÍTULO 1. SITUACIÓN DEL TRÁFICO EN AMBATO	1
1.1. Descripción general de Ambato	1
1.2. El Tráfico en Ambato.....	3
1.3. Revisión de técnicas relevantes.....	11
1.4. Objetivos de la tesis	19
CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA SATURACIÓN	21
2.1. Introducción	21
2.2. Zona de estudio	22
2.3. Depuración e imputación de datos	25
2.4. Análisis exploratorio entre arcos y nodos	30
2.5. Análisis de Componentes Principales	37
2.6. Modelos de Predicción.....	40
2.7. Flujos Origen-Destino Dinámicos	52
2.8. Conclusiones	64
CAPÍTULO 3. APLICACIÓN A LA RED DE ESTUDIO	67
3.1. Introducción	67
3.2. Imputación de valores de flujo faltantes en arcos	67
3.3. Análisis de Componentes Principales en la Red.....	72
3.4. MDLs para predicción de la saturación	87

3.5.	Flujos OD Dinámicos.....	91
3.6.	Conclusiones	96
CAPÍTULO 4. MODELO DE SIMULACIÓN-OPTIMIZACIÓN PARA LA EXPANSIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO		99
4.1.	Introducción	99
4.2.	Esquema de simulación-optimización	100
4.3.	El impacto de las intervenciones.....	103
4.4.	Medidas de evaluación.....	106
4.5.	Caso.....	107
4.6.	Conclusiones	112
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TEMAS FUTUROS		115
5.1.	Resumen.....	115
5.2.	Problemas abiertos.....	117
BIBLIOGRAFIA.....		121
ANEXOS		127
Anexo 1.- Recopilación y Análisis de Información.....		129
Anexo 2.- Tablas de datos empleados en el desarrollo de la tesis		133

Resumen

La inversión orientada a la gestión de actividades integradas para un mejor desarrollo comunitario determina el progreso de una ciudad. Así, generar acciones encaminadas al cambio, evolución y mejora de la calidad de vida promueve una mayor satisfacción entre sus habitantes.

El tránsito es uno de los factores más importantes en mejorar tal calidad en las ciudades. Por tanto, una buena planificación vial es de vital importancia para su desarrollo económico y humano. Esto es especialmente significativo para una ciudad comercial como Ambato, que depende del tráfico en todas sus actividades.

Este trabajo pretende dar solución a distintos problemas detectados en el tráfico de la ciudad, a partir de entrevistas con expertos y el análisis exploratorio de muestras de conteo de tráfico. Para ello, nos centramos en diseñar un modelo que ayude a simular el tráfico y ofrezca posibles alternativas de solución a los problemas que se presentan en el flujo vehicular en una ciudad. Si se pudiese predecir tal flujo en tiempo real, dada la situación reciente, se podrían prever posibles problemas de saturación en un futuro próximo en las vías principales de la ciudad, por ejemplo, a 15 minutos, y ayudar a encontrar alternativas que mitiguen o eviten tales problemas, reduciendo, en consecuencia, tiempos de viaje, gasto de combustible y contaminación.

Con este fin, se ha realizado la investigación que se detalla a continuación:

- Determinar el estado actual del tráfico en la ciudad de Ambato, con el propósito de definir una zona adecuada de estudio y plantear objetivos específicos que coadyuven a afrontar los problemas encontrados en la zona elegida.
- Definir y aplicar métodos y modelos que ayuden a determinar los puntos de mayor conflicto dentro de la zona elegida, y permitan predecir flujos vehiculares y probabilidades de saturación para tomar decisiones, de ser posible, antes de que se produzca la saturación.
- Crear un modelo de simulación que permita determinar las alternativas más adecuadas que ayuden a evitar o solucionar problemas de tráfico en la zona de estudio.

Cumpliendo con los objetivos indicados, en el primer capítulo, se realiza un diagnóstico de la situación actual del tráfico en la ciudad de Ambato, detectando y ubicando las zonas de mayor conflicto, las causas por las que se produce este fenómeno, y los planes de acción propuestos o ejecutados hasta el momento para solucionar tales problemas. Esto permitirá definir un conjunto de objetivos específicos que se van cumpliendo en el desarrollo de la investigación. También se presentan diferentes tipos de modelos matemáticos que se han aplicado en situaciones similares, a partir de los cuales, se plantea una alternativa diferente para tratar el tráfico en los siguientes capítulos.

En el segundo capítulo, se toma una pequeña zona de la ciudad, en la que se presenta la mayoría de problemas de tráfico por diferentes circunstancias. Esta área se toma como zona de experimentación para ilustrar los métodos de imputación de datos, de análisis y de predicción de tráfico propuestos, con el fin de determinar las intersecciones de mayor incidencia dentro de la red vial y las probabilidades de saturación en las diferentes rutas origen – destino.

El tercer capítulo muestra un análisis ampliado a la zona de estudio, aplicando los métodos diseñados anteriormente, logrando identificar en detalle los lugares y rutas donde se debe actuar para mejorar el tráfico.

El cuarto capítulo detalla el modelo de simulación, con el que, una vez definidas las intersecciones y rutas de mayor conflicto, se tratan de evitar posibles saturaciones mediante un conjunto de intervenciones de tráfico. También se describen métodos que ayudan a identificar la intervención más adecuada en cada caso.

Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones de esta investigación y las líneas de investigación futuras.

Abstract

Investments oriented towards integrating management activities based on community development, determine the progress of a city. Thus, generating actions to change and improve quality of life may promote greater satisfaction among its inhabitants.

Traffic is one the most significant factors in city life quality. Thus, a good road planning is vital for economic and human development. This is especially significant for a city like Ambato, which is heavily dependent on traffic for all its activities.

This research aims at providing solutions to a variety of problems identified in the traffic of that city, based on interviews with experts and exploratory data analysis of traffic count samples. For that, it focuses on developing a model to help simulating traffic and determining possible solutions to problems arising in the traffic flow in a city. If we could forecast traffic in real time, given the recent situation, we could forecast possible saturation problems in the near future on the main roads of the city, helping to find alternatives that avoid such problems, reducing consequently journey times, fuel consumption and pollution.

For this purpose, this research was performed as follows:

- Determine current traffic conditions in Ambato, in order to define an appropriate study area and pose specific objectives that contribute to face the problems encountered in the chosen area.
- Define and implement methods and models to help determine the points of greatest conflict within the chosen area and predict traffic flow and saturation probabilities to make decisions, if possible, before they happen.
- Create a simulation model to determine the most suitable alternatives to help prevent or solve traffic problems in the study area.

Complying with the objectives indicated, in the first chapter, a diagnosis of the current traffic situation in Ambato is performed, detecting and locating areas of greatest conflict. The reasons for this phenomenon occurs and the proposed plans to solve traffic problems

are described. The project also reviews different types of mathematical models that have been applied in similar situations.

In the second chapter, a small area of the city with most of the relevant traffic issues is analyzed. It is used as an experimental area to illustrate methods of data imputation, analysis and prediction to determine the intersections of greater incidence over the road network and the probabilities of saturation at different origin – destination routes.

The third chapter shows an enlarged study using the methods previously proposed. We thus identify in detail the intersections and routes where action must be taken to improve traffic.

The fourth chapter details a simulation model, where, with the intersections and routes most troubled defined above, we can try to avoid possible saturation with a set of traffic interventions. Also, describe methods to help identifying appropriate interventions.

Finally, conclusions and recommendations of this research are presented, as well as future research lines.

CAPÍTULO 1

SITUACIÓN DEL TRÁFICO EN AMBATO

1.1. Descripción general de Ambato

La ciudad de Ambato está ubicada a 128 kilómetros del sur de Quito, en el centro de Ecuador, en la Cordillera de los Andes, rodeada de volcanes y nevados como el Tungurahua (5.023 msnm), el Chimborazo (6.268 msnm) o el Carihuayrazo (5.018 msnm). Tiene clima templado y se asienta sobre un sistema de terrazas en diferentes niveles y topografía irregular, atravesada por el río de su mismo nombre y rodeado por lomas y colinas. Se encuentra enclavada en una hondonada formada por seis mesetas: Píllaro, Quisapincha, Tisaleo, Quero, Huambaló y Cotaló. Por esta razón, en algunos lugares se ha hecho difícil el trazado de vías debido a las pronunciadas pendientes y a la irregularidad topográfica del terreno.

Por lo que respecta a su arquitectura y diseño urbanístico, son relativamente nuevos, pues tuvo que reconstruir en varias ocasiones sus edificios públicos y viviendas debido a fuertes movimientos sísmicos. En particular, el terremoto de 1949 fue desastroso para la ciudad, por lo que se encuentran pocos edificios antiguos. El Presidente de Ecuador de entonces, Velasco Ibarra, tomó la decisión de reconstruir la ciudad, encargando dicho trabajo al Arquitecto Durán Vallén, que diseñó las vías con la dimensión necesaria para el tráfico de aquel momento. La malla vial fue creada en forma de cuadrícula, lo que permitía superar los obstáculos topográficos existentes en aquel momento.

En la actualidad, el adelanto económico de Ambato es evidente, contando con casi todos los servicios propios de una ciudad moderna. Según datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Censo (Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos - INEC), en el

2010 la población del cantón de Ambato era de 287.282 habitantes dentro de la zona urbana y, en su totalidad, de 329.856 habitantes.

Economía y Comercio

Ambato se caracteriza por ser un nodo de gran actividad comercial en el contexto nacional, existiendo un intenso comercio, sobre todo el lunes, día de feria en los diferentes mercados, lo que intensifica el tráfico vehicular en varios sectores de la ciudad. Posee un motor industrial y comercial de gran importancia para la economía del centro del país y del Ecuador, en general, gracias a las industrias que se encuentran en la ciudad como es el caso de la Corporación de Empresas del Parque Industrial Ambato (CEPIA). Cuenta con el principal centro de suministro de alimentación del centro del país, que es el Mercado Mayorista. De este centro, se distribuye al resto de mercados minoristas de la ciudad, provincia, región central y, en casi su totalidad, a la Amazonía. Entre diciembre y abril, Ambato produce una gran cantidad de fruta, por lo que se intensifica la cantidad de vehículos que se movilizan para transportar a los diferentes mercados de la ciudad y del país.

Recientemente, la Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) definió las ciudades que servirán como sedes administrativas de las siete regiones creadas para reorganizar la gestión de la Función Ejecutiva. Dentro de este contexto, Ambato es la capital de la región #3, que corresponde a las provincias centrales de Ecuador: Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Pastaza.

Transporte

Ambato cuenta con una red de carreteras que la unen con Quito, Guayaquil y otras poblaciones cercanas. Tiene un aeropuerto con tráfico exclusivamente local. Dentro de la ciudad, la forma más cómoda de transporte es en taxi. De hecho, es una de las ciudades con mayor número de taxis por habitante en el mundo, ya que las tarifas son económicas y la calidad del servicio es buena.

En las últimas décadas, Ambato ha experimentado un considerable incremento poblacional y de las edificaciones. Por ello, cuenta con una gran cantidad de autobuses (cinco líneas urbanas y tres rurales) que abarcan todos los rincones del área metropolitana y con los que se conecta fácilmente con el casco urbano y las zonas comerciales. La falta de fluidez de los vehículos particulares en sus avenidas también hace recomendable el uso del transporte público por la ciudad, al igual que el uso de motos.

1.2. El Tráfico en Ambato

El tráfico urbano es uno de los problemas que más influyen en la calidad de vida de los residentes en las ciudades. Este tráfico se ha acentuado en las últimas décadas, por el desarrollo de tres fenómenos simultáneos:

- El incremento del uso del automóvil privado en detrimento del transporte público, debido a que este resulta insuficiente para cubrir todos los sectores de la ciudad;
- La generalización del modelo de ciudad difusa (Nel-lo, 1998), que ha alcanzado su desarrollo actual tras un proceso descentralizador;
- El crecimiento económico.

Según registros del Concejo Provincial de Tránsito, se matricularon 25.510 autos en 2006. En el año 2011, la cifra subió a 50.000. Están registrados 400 autobuses, 3.500 taxis y 2.000 camionetas. Además, Ambato es una ciudad eminentemente comercial, por lo que circulan vehículos matriculados en cantones vecinos, especialmente en los días de mayor comercio.

La geografía de la urbe y la creciente presencia de autos, sumado a la concentración de entidades públicas y privadas en ciertas zonas de la ciudad, la buena actividad comercial de los mercados e industrias, la gran concentración alrededor de los centros educativos, entre otros, complican el tránsito en Ambato. Por ello, el Cabildo ha comenzado un estudio para implantar un sistema de transporte masivo municipal y decidir si éste puede operar en conjunto con los actuales autobuses de transporte público. En 2007, el

Municipio asumió las competencias del transporte y, desde entonces, se aplican en la urbe proyectos que han mejorado ligeramente la circulación peatonal y vehicular.

Para la Dirección de Tránsito y Movilidad de Ambato (DTM)¹, la prioridad es solucionar el incremento desmedido del parque automotor y los problemas generados por esta razón, en un territorio de apenas 1200 km². Las medidas propuestas se centraron inicialmente en la optimización del tráfico mediante semaforización centralizada.

El Plan de Ordenamiento Territorial de Ambato, proyectado para 2020, está posibilitando que el centro de la ciudad, lugar de concentración de entidades públicas y privadas, sea más transitable para peatones y autos. Además, entró en operación un aparcamiento tarifado para unos 5.000 vehículos (Ilustre Municipio de Ambato, 2009).

Según la DTM, de los 50.000 mil vehículos que circulan por la ciudad, el 80% son particulares. El uso de auto propio va en aumento, especialmente, en el casco urbano, en el que confluyen el 74% de viajes diarios. En estudios previos (Solórzano, 2008) se determinaron problemas de congestión y flujo vehicular alrededor de los terminales y paradas de autobús existentes por lo que, en la actualidad, se está remodelando la estructura física del terminal de Ingahurco para mejorar el flujo y brindar un mejor servicio.

1.2.1. Algunos problemas de tráfico en Ambato

Debido a que existe poca información disponible al público, se realizaron entrevistas a funcionarios públicos conocedores del tráfico en Ambato pertenecientes a la DTM. Los problemas de tráfico parecen producirse por la alta tasa de medios de transporte que circulan por calles y avenidas de la ciudad, que no fueron diseñadas para el volumen de tráfico que existe hoy en día y que, cada año, va en aumento. Así, cada vez se agudiza más la falta de fluidez del tráfico, debido a la restringida capacidad vial.

¹ Departamento del cabildo que tiene la competencia del tráfico en la ciudad

La semaforización existente en la ciudad ha cumplido ya su vida útil, lo que hace que los conductores y peatones no respeten las señales de tránsito, pues la información de semáforos es inadecuada para el volumen de vehículos y personas que circulan diariamente. Por tanto, podrían ser objeto de estudio con el fin de solucionar conflictos relacionados con el tráfico. Hay que tener en cuenta que el tiempo de vida útil de un sistema semafórico es de aproximadamente cinco años según experto de la DTM.

Zonas de mayor conflicto en el flujo de tráfico en la ciudad de Ambato

Las zonas de más conflicto, según observaciones de la DTM, véase Figura 1.1, son:

1. En las Avenidas Indoamérica y Pedro Vascones, redondel de las Focas en Izamba.
2. La intersección de las Avenidas Atahualpa y Víctor Hugo, sector del Mall de los Andes.
3. La intersección de las Avenidas Atahualpa y Los Shyris.
4. Redondel del Estadio Bellavista.
5. Redondel del Servicio Ecuatoriano de Capacitación (SECAP), en donde existen problemas de flujo de tráfico en horas punta.
6. Redondel de Huachi Chico, donde no existen paradas de autobuses señaladas para el transporte interprovincial e intercantonal que llegan al lugar dificultando la movilidad de vehículos.
7. La intersección entre la Avenida Rodrigo Pachano y la Calle Montalvo, que se cambió recientemente de redondel a un distribuidor de tráfico controlado por un sistema semafórico que, posteriormente, se deberá cambiar por pasos subterráneos o elevados.
8. La intersección del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) entre la Avenida Rodrigo Pachano, Lalama y la Avenida Los Guaytambos.
9. Redondel del Mercado Mayorista.
10. Redondel de Cumandá.
11. Avenida 12 de Noviembre y Eugenio Espejo.

12. La intersección en forma de Y de la calle 13 de Abril y calle Juan León Mera.
13. El Casco Central Urbano de la ciudad, limitado al sur por la calle Francisco Flor, al norte por la calle González Suárez, al oeste por la calle Lizardo Ruíz, y al Este una parte por la Avenida 12 de Noviembre y la calle Olmedo.
14. Los estacionamientos tarifados dentro del caso central urbano son elementos de conflicto de tráfico, ya que, al ocupar uno de los carriles de la vía, se reduce la capacidad de la misma.
15. Los alrededores de los terminales existentes (Ingahurco, Píllaro, Pasa y de las Américas) marcados en la Figura 1.1 como A, B, C y D, respectivamente. Los mismos que se encuentran ubicados en áreas reducidas, y sin estudio previo, dentro de la zona urbana en la ciudad. Las áreas circundantes se encuentran totalmente saturadas de vehículos en sus intersecciones porque las unidades de transporte incumplen los horarios de frecuencias previamente establecidas.

Como se puede observar en la Figura 1.1, las zonas de mayor conflicto dentro de la ciudad de Ambato según observaciones por parte de la DTM, son quince. De ellas, el casco central urbano de la ciudad es en donde más conflicto se produce para el flujo vehicular. Desde luego estas intersecciones inciden en el tráfico interno que señala la DTM.

A partir del numeral 10, incluidos los terminales A y B que se mencionan en el numeral 15, se indican puntos que se encuentran estrechamente relacionados entre sí, ya que son intersecciones directas de entrada y salida de vehículos del casco urbano. Además, en esta zona se encuentran ubicadas varias instituciones públicas y privadas y por el sector circulan la mayoría de líneas de transporte urbano, elevando aún más el problema de congestión. Por esta razón, se ha escogido parte del casco urbano de la ciudad para realizar un estudio, con el fin de dar posibles alternativas de solución para mejorar el flujo vehicular a través de sus vías.

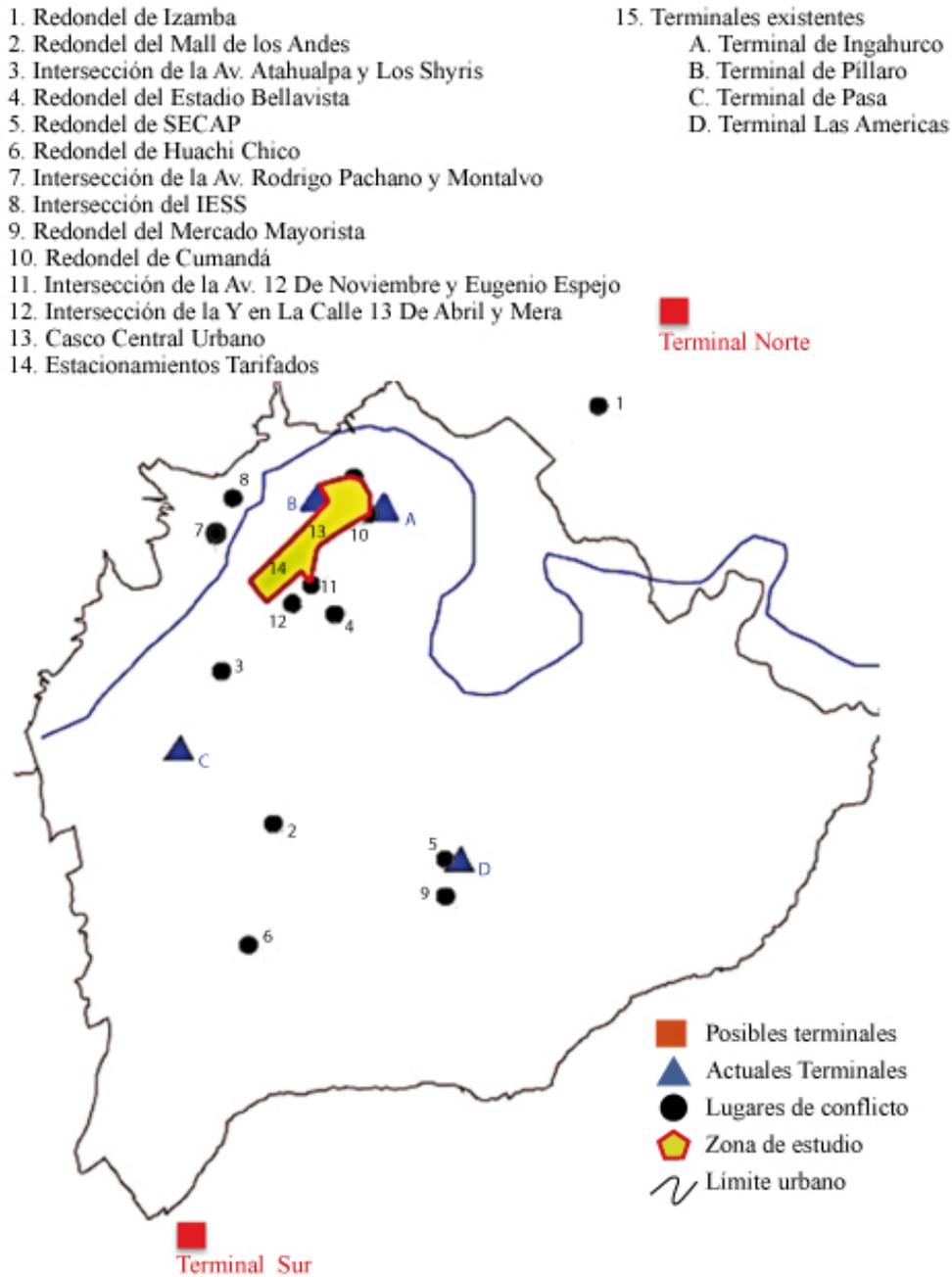


Figura 1.1. Mapa de localización de puntos de conflicto de tráfico en Ambato

1.2.2. Análisis del tráfico en la ciudad de Ambato

A continuación se presentan varios problemas de tráfico que han surgido como consecuencia del crecimiento poblacional y la expansión de la ciudad de Ambato, obtenidos a partir de entrevistas con las autoridades de tráfico locales.

1. En la DTM, que tiene la competencia de tráfico, no existe un programa de educación y seguridad vial, que debería explicarse en escuelas, colegios y a la ciudadanía en general. Debe crearse un plan maestro de educación vial para las nuevas generaciones de la provincia.
2. Desconocimiento y falta de respecto a las leyes de tránsito, transporte y seguridad vial por parte de conductores y peatones, quizás consecuencia del punto anterior.
3. No existe infraestructura adecuada en lugares de concentración masiva, como son estadios deportivos, coliseos ó colegios, pues no disponen de aparcamiento para vehículos, requisito indispensable para evitar la congestión vehicular en las vías.
4. La Unidad de Tránsito emite resoluciones, ordenanzas y reglamentos para aplicar en la ciudad de Ambato, pero no existe personal designado ni preparado técnicamente para difundir la información pública.
5. El parque automotor ha crecido sin control. Las importadoras legales traen la mayor cantidad de vehículos posibles. Además, en los países vecinos se trata de evadir impuestos, por lo que llegan vehículos de Colombia, Chile, Perú y Brasil como vehículos de servicio y se quedan en nuestro país, formando parte del denominado “parque automotor sin control de importaciones”.
6. Para realizar proyectos futuros de expansión de tráfico, en función de una base de datos y con aplicaciones tecnológicas, se debe disponer de información actualizada del tráfico de la ciudad de Ambato.
7. El diseño vial, limitada en su geometría, hace que en las intersecciones no exista espacio suficiente para ubicar señalética y semaforizaciones completas. Ese espacio se encuentra ocupado por instalaciones eléctricas y telefónicas que obstaculizan la visibilidad del conductor.
8. Inicialmente, la ciudad de Ambato creció en forma horizontal con sus construcciones por la aplicación de la ordenanza, con la idea de que en la ciudad se construyan viviendas con altura máxima de tres pisos. Sin embargo, se ha visto la necesidad de aumentar el número de pisos de altura, cambiando la ordenanza a seis pisos. Esto ha tenido como consecuencia una mayor concentración de personas y,

por ende, del parque automotor, causando problemas en los diseños geométricos de las vías.

9. La entidad reguladora dio prioridad al tránsito de peatones, por lo que se vieron en la necesidad de aumentar el ancho de las aceras, reduciendo la calzada, con lo que no existe espacio suficiente para vehículos.
10. Por comodidad de los propietarios de los locales comerciales con acceso a vías, éstos utilizan la calzada como área de carga y descarga de productos. En consecuencia, el flujo vehicular se detiene, produciéndose un incremento del tiempo de recorrido entre dos puntos.
11. Para las personas discapacitadas, se deben diseñar espacios e infraestructura necesarios para que puedan subir y bajar de los vehículos y moverse más fácilmente a través de la ciudad. Para ello, hay que crear paradas especiales, lo que también influye en la reducción del espacio de calzada para circulación vehicular.
12. Los sentidos o direcciones de cada una de las vías se suelen decidir sin realizar un estudio que sustente técnicamente la correspondiente decisión.
13. El servicio de autobuses públicos dispone de frecuencias con rutas diarias. Sin embargo, el desorden del tráfico y la disputa por usuarios entre las empresas de transporte suelen alterar dichas frecuencias, por lo que los conductores toman la decisión de crear su propia ruta, acortando distancias. Así, se produce una interferencia de buses urbanos con el transporte privado, causando alteraciones en algunas intersecciones.
14. Todas las instituciones de servicio público, como son los colegios, ayuntamiento, consejo provincial, empresa eléctrica, compañías telefónicas, de servicio bancario y deportivo se ubican en el centro de la ciudad.
15. En Ambato se puede apreciar que la mayoría de los empleados de instituciones públicas, disponen de vehículos de transporte privado y tratan de ocupar tanto garajes como estacionamientos públicos, lo que agrava el tráfico en horas punta.

Tras haber analizado y planteado los problemas de tráfico existentes, cabe pensar que al optimizar el flujo vehicular se pueden solucionar algunos de los problemas que hemos mencionado anteriormente. Con la ayuda de herramientas tecnológicas se podrían realizar estudios que permitan determinar los sentidos de las calles de manera técnica, los desplazamientos entre distintos puntos, ya sea en función del ahorro de tiempo, distancia, o combustible. De esta manera, también bajaría el índice de contaminación, a la vez que se podrían reducir los costes en función de las distancias y la pérdida de tiempo, el gasto de combustible o la degradación ambiental.

Alternativas planteadas hasta el momento

En la actualidad se está desarrollando el Plan Maestro de Semaforización del Tránsito de Ambato. Con él, se busca realizar varios estudios y dar alternativas a problemas existentes respecto al tráfico en el casco urbano de la ciudad. Los datos obtenidos incluyen volúmenes de tráfico de ingreso y salida de vehículos en las diferentes intersecciones del casco. El tiempo aproximado que tardarían en diseñar el proyecto es de ocho meses, pero la aplicación de este plan maestro de transporte de Ambato será a más largo plazo.

Hasta el momento no existe ningún estudio adicional al de semaforización. Sin embargo, la unidad de tránsito se ha organizado para poder superar los inconvenientes del momento en tres áreas: *1. transporte; 2. tránsito; 3. atención al cliente.*

El Ayuntamiento no se ha hecho cargo del control del tránsito puesto que no dispone de personal especializado para realizar dichas labores. Por ello ha delegado en la Policía Nacional para dicho trabajo. Posteriormente, deberán buscar el personal adecuado para esta función.

Ordenanzas de tránsito existentes

Igualmente, se ha publicado la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, promulgada por el Presidente de Ecuador el 25 de junio de 2012, para que el gobierno autónomo descentralizado del Municipio de Ambato, a través de la Unidad de Tránsito, dé cumplimiento de las reglas. Además, se aprobó en 2009 el Reglamento General para la Aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial.

Junto a los antecedentes expuestos, se añaden como anexos las resoluciones administrativas tomadas por la dirección de la unidad de tránsito. Dichas resoluciones van variando de acuerdo a las circunstancias.

1.3. Revisión de técnicas relevantes

El flujo de vehículos en una red urbana presenta aspectos relevantes que justifican un tratamiento más elaborado que la coordinación de un conjunto de arterias. En lo que sigue hacemos una breve revisión de algunas técnicas y modelos relevantes en el problema que nos ocupa.

Definición y principios básicos en redes

Una red vial es un conjunto de calles y avenidas que se cruzan en determinados puntos, denominados intersecciones. En general los tramos de calles o avenidas tienen un cierto sentido de circulación y, por tanto, se designan como dirigidos.

El modelo básico que se empleará está basado en grafos. Un grafo es un conjunto, no vacío, de objetos llamados vértices (o nodos) y una selección de pares de vértices, llamado aristas, que pueden ser orientados o no. Típicamente, un grafo se representa mediante una serie de puntos o vértices conectados por líneas o aristas, véase Taha (2004).

Los estudios de movilidad basados en el análisis y optimización de una red de tráfico mediante la caracterización de la infraestructura y su capacidad incluyen investigaciones de campo necesarias para conocer las relaciones origen/destino y sus principales características: motivo de viaje, aparcamiento en origen-destino, ocupación de los vehículos, tiempo de viaje, entre otras. Nos permite ajustar hasta el máximo detalle las características funcionales de los diferentes elementos del sistema, incluyendo un análisis pormenorizado de las intersecciones y sus diferentes métodos de regulación, véase. Fernandez y Valenzuela (2004) para una introducción.

Asignación del tráfico. El comportamiento del tráfico en las diferentes zonas ha motivado el desarrollo de modelos matemáticos que incluyen como fases típicas.

1. **Fase de generación de viajes.** Es una etapa inicial, en la que se buscan datos relativos a cada zona del estudio. Estos datos tienen información sobre actividades económicas, la distribución social, los recursos educacionales y lúdicos o los espacios para compras, que ayudan a estimar el número total de viajes generados y atraídos por cada zona bajo estudio.
2. **Fase de distribución.** Una vez definidos los lugares de los viajes, se crea la matriz de viajes origen-destino.
3. **Descomposición modal.** En esta fase, la descomposición modal produce la adjudicación de viajes a los distintos modos de transporte. A continuación se obtienen, las matrices origen-destino (OD) para cada modo de transporte, contabilizándose el número total de viajes por cada nodo.
4. **Asignación.** Se realiza la asignación de los viajes a la red de tráfico.

La diversidad del comportamiento de los seres humanos hace imprescindible buscar un principio que facilite el tratamiento del fenómeno complejo del tráfico mediante modelos. Wardrop (1952) estableció formalmente este principio:

Bajo condiciones de equilibrio, el tráfico se organiza en redes congestionadas de modo que ningún vehículo puede reducir el tiempo de viaje mediante un cambio de ruta.

Este principio, también denominado *Deterministic User Equilibrium* (DUE), supone que los usuarios intentan minimizar sus costes de operación al realizar sus viajes. Si pudieran hacerlo, cada usuario elegiría la ruta más corta (en términos de tiempo de viaje, por ejemplo) para llegar a su destino. Sin embargo, en general, se produce el fenómeno de congestión vehicular, es decir, la ruta más corta deja de serlo cuando demasiados usuarios tratan de emplear los mismos arcos de red. Los usuarios entonces considerarán otras rutas hasta encontrar aquella que tenga el mínimo coste posible, dadas las condiciones de operación existentes en la red. Cuando todos los usuarios hayan encontrado esta ruta más conveniente, la red de transporte se encontrará en equilibrio. Una conclusión de este principio es que el coste de todas las rutas utilizadas es menor o igual que el coste que soportaría cualquier vehículo que emplease alguna de las rutas no utilizadas y que el coste medio del viaje en todas las rutas utilizadas es el mínimo posible, véase Castillo et al. (2002).

La primera formulación de las condiciones de equilibrio mediante un modelo de optimización fue realizada por Beckman y Mc Guire (1956) que propusieron métodos de cálculo de equilibrios estáticos de tráfico. Formularon el siguiente problema que expresa la condición de equilibrio según el primer principio de Wardrop. Se denomina Problema de Asignación de Tráfico (PAT):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & Z = \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} C_a(x) dx \\ \text{s.a:} \quad & \sum_{p \in P_w} h_p = T_w \quad \forall w \in W \\ & f_a = \sum_{p \in P} \delta_{ap} h_p \quad \forall a \in A \\ & h_p \geq 0, \quad \forall p \in P, \forall w \in W \end{aligned}$$

donde:

W : es el conjunto de todos los pares OD conectados en el grafo $G(N,A)$

w : un par de nodos $OD(i,j)$, con origen i y destino j

P : el conjunto de todas las rutas (caminos) percibidos en $G(N,A)$

p : ruta definida para un par de nodos OD

P_w : el conjunto las rutas que conectan el par $w(i,j)$

T_w : el total de usuarios que viajan por el par w

δ_{ap} : el conjunto de arcos que pertenecen a la ruta

h_p : flujo de usuarios que utilizan la ruta p

A : conjunto de arcos

a : arco que une dos nodos consecutivos

f_a : flujo de usuarios que utilizan el arco a

C_a : coste en el arco a

Las restricciones se interpretan como:

- (1) La ecuación de flujo: la suma de flujos a través de todas las rutas entre dos nodos debe ser igual a la demanda de desplazamientos entre ambos nodos.
- (2) El flujo por cada arco será igual a la suma de los flujos de todas la rutas que utilicen dicho arco
- (3) La ecuación de no negatividad: el flujo por cada ruta ha de ser no negativo.

En la función objetivo, la variable a optimizar es el flujo en los arcos con el fin de minimizar los costes de viaje. En el conjunto de restricciones tenemos como variables el flujo en el camino entre cada par origen destino. Estos estudios pueden usarse para responder a cuestiones como qué ocurriría en el nivel de uso de la red si se construyera una nueva carretera o si la capacidad de una determinada ruta se modificara, como exploramos en esta tesis.

Modelos de tráfico vehicular

La decisión de un ser humano es, en principio, una actividad individual. Cada usuario define cómo llegar a un destino, eligiendo la que considere mejor ruta, considerando factores como coste, tiempo, seguridad y comodidad. El usuario debe decidir qué ruta recorrer y qué modos de transporte utilizar lo que depende, entre otras cosas, de la congestión en los arcos o vialidades de la ruta, no siendo un problema sencillo.

Los flujos estimados pueden servir tanto para describir el tráfico como para predecir o recomendar un patrón de flujo vehicular en una red. Para ello, por ejemplo, pueden emplearse los modelos de Castillo et al. (2002) o Tebaldi y West (1998), que representan el comportamiento macroscópico del tráfico en grandes zonas urbanas o ciudades enteras. Mediante estos modelos es posible estimar los flujos vehiculares en una red donde existe cierta demanda de viajes y los efectos de la congestión hacen que los tiempos de viaje en los arcos dependan de los flujos.

En las últimas dos décadas, se ha dedicado considerable atención a la búsqueda de métodos para resolver el problema de estimación de la matriz O-D a partir de las densidades de tráfico en algunos arcos por ejemplo: Yang et al (1992); Vardi (1996); Maher y Zhang (1999); Hazelton (2000) y (2003). Cascetta y Nguyen (1988) resuelven el problema mediante problemas de optimización, que se pueden formular como en Cascetta (1984), Maher et al. (2001), y en Doblas y Benitez (2005). Una alternativa a este tipo de métodos de estimación de O-D, basados en *modelos bayesianas* (BN) fue dada por Tebaldi y West (1998) y Sun et al. (2006), que utilizaron un modelo de mixturas gaussianas cuyos parámetros se estiman mediante un algoritmo EM.

Obsérvese que el problema de estimación de la matriz O-D no está bien determinado, porque normalmente el número de pares O-D es mucho mayor que el número de enlaces en que se basa la estimación. Así, a pesar de que existen relaciones lineales entre ellos, no es suficiente para producir una solución única. Bierlaire (2002) discute este problema y propone el uso del volumen del poliedro resultante de todas las soluciones como una medida de calidad de la estimación.

Modelos de asignación de usuarios

Inicialmente, se pueden clasificar los modelos de asignación de usuarios entre estocásticos (con sus siglas en inglés, SUE) y deterministas (DUE). En los primeros, los costes de usuario se consideran variables aleatorias y la selección de ruta puede ser diferente para cada usuario. Por el contrario, en el caso determinista se supone que todos

los usuarios tienen información perfecta sobre itinerarios y costes. Por lo que todos viajan empleando las rutas de menor coste. Entre los modelos propuestos, Daganzo y Sheffi (1977) fueron los primeros en definir el concepto de SUE y usaron distintas versiones como el modelo logit multinomial simple (MNL) o el probit multinomial (MNP).

Los modelos existentes de asignación de equilibrio pueden ser de dos tipos: de equilibrio del usuario y de optimización del sistema. Un modelo de equilibrio del usuario se basa en el primer principio de Wardrop. Esto conlleva que las rutas empleadas sean las más cortas en tiempo, bajo las condiciones de tráfico existentes. El modelo de optimización del sistema tiene como objetivo la minimización del tiempo total de viaje en el mismo. En esta asignación, ningún usuario puede cambiar de ruta sin incrementar el tiempo total de viaje, aunque sí puede disminuir su propio tiempo. Por tanto, en este modelo se asigna una ruta a cada usuario y éste la respeta, con lo que se minimiza la congestión.

El problema de asignación dinámica del tráfico se ha abordado con diversos enfoques de simulación, teoría del control óptimo y optimización. Estos modelos consideran que los usuarios minimizan sus tiempos de viaje actualizando continuamente las rutas elegidas según las condiciones del tráfico.

Este problema es especialmente importante en los sistemas avanzados de información a viajeros *Advanced Traveler Information Systems* (ATIS), que permiten recomendar rutas de acuerdo con el tiempo de viaje futuro. Su objetivo es mejorar el comportamiento del tráfico, reduciendo la congestión. Se encargan de difundir información que permita tomar decisiones sobre el viaje que se debe realizar, como, por ejemplo, cuál es la mejor ruta para llegar al destino usando un vehículo o qué combinación de transportes públicos se debe realizar y cuál es el coste. Estos sistemas benefician en diferentes aspectos a las personas y a la ciudad. Por ejemplo, mejoran la movilidad, haciendo un uso óptimo de las calles y disminuyendo el tiempo de desplazamiento de un lugar a otro. También beneficia a los usuarios, ahorrándoles tiempo, dinero y brindándoles seguridad e información (Levinson, 2003).

Otra tecnología recientemente incorporada al análisis de las redes de flujo es la de los sistemas de información geográfica de apoyo al transporte. La representación y el análisis de las redes de transporte ha mejorado con el desarrollo de estos sistemas pues, además de permitir una representación topológica de la red, con ellos se puede hacer una representación geográfica de la misma. El aspecto principal es que los análisis de redes pueden combinarse con análisis espaciales que consideran características del territorio tales como uso de suelo, crecimiento de la mancha urbana y datos de atributos demográficos o socioeconómicos. Así, surge la posibilidad de crear escenarios hipotéticos para cambios en la infraestructura vial o en la demanda, véase Cardozo et al. (2006).

Los impactos urbanos y ambientales asociados al tráfico van, en gran medida, directamente asociados al grado de saturación (x) de cualquier dispositivo vial (vía, intersección, paradero, red). El grado de saturación se define como la razón entre el flujo que usa el dispositivo (q) y su capacidad (Q), es decir,

$$x = q/Q.$$

Se debe diferenciar el grado de saturación (x), arriba definido, de la denominada congestión. La segunda es consecuencia del primero y suele manifestarse en:

- Demoras adicionales a las personas, más allá de las requeridas para hacer un viaje a una velocidad segura y constante.
- Colas de vehículos o personas, que se generan en tramos de vía, cruces o terminales de transporte público o privado como paradas de autobuses o estacionamientos.
- Detenciones involuntarias de vehículos o usuarios, que ocurren en los mismos lugares anteriores, producto del avance y estancamiento de una cola (condición start-stop).

Varios estudios, véase por ejemplo Akcelik (1981) o IHT (1997), indican que las manifestaciones de la congestión comienzan a producirse para valores de x superiores a

0,7 ó 0,8. Lo anterior se ilustra en la Figura 1.2, en la que se muestra la evolución de un índice de congestión, la demora por usuario en un cruce, en un caso particular.

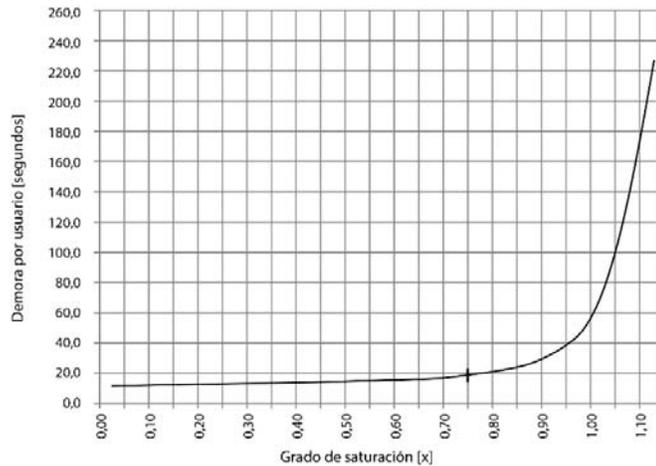


Figura 1.2. Variación de la demora con el grado de saturación en un cruce

Fuente: Fernandez y Valenzuela (2004), pág. 100

En tal figura se observa que el aumento acelerado de la demora comienza a manifestarse para $x = 0,75$. A partir de ese momento, un aumento del flujo, produce un aumento más que proporcional en la demora. Por ejemplo, para grados de saturación moderados, si x aumenta de 0,75 a 0,80 (7% de variación) la demora aumenta un 12%. Sin embargo, al borde de la sobresaturación, si x varía de 1,00 a 1,05 (5% de variación) la demora aumentaría un 80%. Este comportamiento se repite para otros índices de congestión como las longitudes de cola y las detenciones. Algo similar ocurre con otros impactos derivados del tráfico como polución, ruido, riesgo, segregación, intrusión visual, inaccesibilidad al transporte público, etc., véase Fernandez y Valenzuela (2004).

En este trabajo, nos concentramos en el problema a corto plazo de la previsión del flujo de tráfico, que consiste en determinar los flujos de tráfico en un intervalo de tiempo, normalmente de 15 minutos a dos horas. Durante las últimas décadas, se han propuesto con distinto grado de complejidad, modelos de predicción de flujo de tráfico. Los más simples son los de combinación de recorridos aleatorios, pero sólo funcionan bien en situaciones muy específicas, véase Williams y Hoel (1999). Una aproximación más

compleja, véase Head (1995), se basa en modelos de series temporales ARIMA; ARIMA estacionales como en Williams y Hoel (1999), Lee y Fambro (1999); filtros de Kalman (Okutani & Stephanedes, 1984); redes neuronales (Castillo, et al., 2002); simulación, véase Banks (1998) y Barceló (2010); modelos de regresión local (Willumsen, 1978); combinación de mapas de Kohonen y modelos ARIMA (Voort, et al., 1996); y, finalmente, cadenas de Markov (Yu, et al., 2003).

1.4. Objetivos de la tesis

Hemos descrito cómo el tráfico de vehículos en las ciudades conlleva la degradación de la calidad de vida urbana como ocurre, de hecho, en Ambato. Ésta se manifiesta, conforme aumenta el grado de saturación, por lo que el presente trabajo está dirigido a alcanzar los siguientes objetivos:

- Elegir una zona de estudio dentro del casco urbano de la ciudad de Ambato.
- Realizar un diagnóstico general del tráfico en la zona de estudio midiendo el flujo vehicular producido en un momento determinado. Este diagnóstico puede servir como ejemplo para otras zonas de la ciudad e, incluso, otras ciudades del país que tengan similares problemas de tránsito urbano.
- Construir diversos modelos que nos permitan identificar zonas calientes de tráfico y, así, predecir a corto plazo el tráfico en una vía a partir de datos anteriores y el tráfico en todo el conjunto del área de interés (a partir del concepto de flujos OD dinámicos).
- A partir de los modelos anteriores, determinar la probabilidad de saturación en cualquier ruta, desde cierto origen a cierto destino.
- Basados en el modelo anterior, determinar actuaciones de intervención rápida que mejor mitiguen los problemas de gestión de tráfico, con ayuda de técnicas de simulación y optimización.

La aproximación general empleada consistirá en la introducción de una serie de métodos que consideramos relevantes para la predicción y gestión del tráfico, aplicados a una red reducida para ilustrarlos y, más tarde, aplicarlos a una red de tamaño real.

En el segundo capítulo, introducimos los métodos que nos permiten diagnosticar en detalle problemas de tráfico en una ciudad. Esencialmente, primero métodos para evaluar, depurar e imputar datos de tráfico, con objeto de mejorar la calidad de los mismos. Después, introducimos métodos de análisis de componentes principales que nos permiten identificar puntos calientes y rutas principales de tráfico. Además, presentamos una clase de modelos dinámicos lineales que nos permite predecir eficientemente el tráfico en puntos localizados en una red y, finalmente, un modelo para predecir los denominados flujos OD dinámicos. Ilustramos todos estos métodos, como hemos dicho, en una red pequeña.

En el tercer capítulo, aplicamos toda la maquinaria anterior a una red mayor referida a nuestra zona de estudio. Con ello exploramos la escalabilidad de los métodos propuestos. En conjunto conseguimos un diagnóstico detallado de los problemas de tráfico, que intentamos resolver en el Capítulo 4.

Para ello, en ese capítulo presentamos primero una metodología de simulación basada en el modelo estocástico del segundo capítulo que nos permite simular el impacto de distintas intervenciones de tráfico y, en consecuencia, determinar las mejores actuaciones para mitigar los problemas anteriores. Tales modelos se ilustran con nuestras redes. Todos los experimentos y modelos ilustrados en los capítulos 2, 3 y 4 se han implementado en R.

Concluimos con un quinto capítulo en el que se resumen los logros obtenidos y se identifican una serie de problemas abiertos para investigaciones futuras.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA SATURACIÓN

2.1. Introducción

El problema del tráfico en Ambato tiene gran complejidad. Dentro del casco urbano se encuentran distribuidas varias intersecciones de calles y avenidas en las que, inicialmente, no se producían conflicto. Sin embargo, esta situación ha cambiado con el paso de los años debido a la expansión de la ciudad y al crecimiento poblacional y vehicular. Como se ha manifestado anteriormente, en la actualidad se está desarrollando el Plan Maestro de semaforización del Transporte de Ambato, para el que se realizó una recolección de datos que incluyen volúmenes de tráfico de ingreso y salida de vehículos en algunas de las intersecciones.

En este capítulo introducimos métodos que nos permiten analizar desde diversas perspectivas algunos de los datos obtenidos en tal estudio, centrándonos en una de las zonas más conflictivas de tráfico en Ambato. Nuestro objetivo final es construir modelos de predicción del volumen de tráfico que permitan predecir la eventual saturación en los distintos puntos de la ciudad. Además, describiremos desde varios ángulos el estado de tráfico en la zona de interés, determinando las intersecciones de mayor relevancia dentro de la red, utilizando modelos de predicción para determinar posible saturación en las vías.

Específicamente, consideramos métodos para depuración e imputación de datos de flujos de tráfico; métodos de análisis de componentes principales para detectar los problemas principales de tráfico; modelos dinámicos lineales para poder predecir volúmenes de tráfico a corto plazo y saturación; y, finalmente, métodos para predecir los que

denominamos flujos origen – destino dinámicos y la eventual saturación en las rutas principales de la ciudad.

Aquí introducimos los métodos y los presentamos en una pequeña zona para facilitar su comprensión. En el Capítulo 3 los probamos en una zona mayor para probar su escalabilidad.

2.2. Zona de estudio

En la Figura 2.1 se muestra la zona de estudio en forma de grafo (arcos y nodos). Corresponde al área marcada en color amarillo del mapa de Ambato expuesto en la Figura 1.1. Forma parte del casco central urbano, una de las zonas de mayor conflicto de tráfico en la ciudad. Los nodos de color gris se denominan nodos aforo o aforos. En ellos se han realizado mediciones de flujo vehicular por parte de la DTM. Se ha definido la zona de estudio inicial teniendo en cuenta su mayor concentración de nodos aforo y la especial relevancia económica de la misma. Los nodos aforo que se encuentran fuera de la red no han sido incluidos por encontrarse demasiado alejados para tener influencia clara en el tráfico. Los rectángulos de color azul indican lugares, mercados o instituciones con gran afluencia de personas y vehículos.

Finalmente, se ha seleccionado la zona marcada con fondo amarillo como punto de partida para realizar un estudio profundo de su comportamiento, lo que luego facilitará ampliar el estudio de la red completa expuesta en la Figura 2.1 en el Capítulo 3, pues este sector contiene la mayoría de características (paradas de autobuses, locales comerciales, gran afluencia vehicular) presentes en el conjunto de la red. Además, actúa como punto principal de entrada y salida de la red de interés.



Figura 2.1. Red vial de la zona de estudio con intersecciones consideradas como nodos

Según el informe del Estudio de Ingeniería de Tránsito para la Semaforización Centralizada en el casco urbano de la ciudad de Ambato, inicialmente se había planificado

la captura de información primaria sobre 30 intersecciones. La DTM estableció el inicio y la terminación de las horas de máxima demanda de la mañana (6:45 a 9:00 AM), medio día (12:00 a 14:00) y de la tarde-noche (16:00 a 19:00). Los aforos vehiculares en estaciones maestras tuvieron una duración de 8 horas, tomados desde 3 hasta 7 días. Los aforos vehiculares en intersecciones que se encuentran dentro del casco urbano se realizaron en un solo día hábil y se incluyeron todos los accesos de cada una de las intersecciones. Los vehículos se clasificaron en tres tipos: automóvil (A), autobús (B) y camión (C). Se agregaron mediante la fórmula Vehículos equivalentes = $A+2*B+2,5*C$.

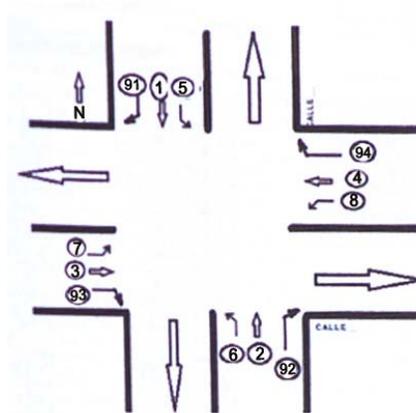


Figura 2.2. Esquema de asignación de grupos de personas para la toma de datos en las intersecciones

Según los formularios que posee la DTM, se registran los conteos vehiculares en períodos de 15 minutos. Para la toma de datos en los nodos aforo se designaron grupos de personas encargadas del conteo según las posibles direcciones que pudiesen tomar los vehículos al pasar por la intersección, según el esquema guía que se muestra en la Figura 2.2.

En el caso del redondel de Cumandá, por tratarse de uno de los accesos principales, y debido a que tiene múltiples entradas y salidas, se creó un esquema diferente asignando un grupo de personas para el conteo de vehículos por cada entrada o salida existente según muestra la Figura 2.3.



Figura 2.3. Esquema de asignación de grupos de personas para la toma de datos en el redondel de Cumandá

Adicionalmente a la toma de aforos vehiculares, se llevó a cabo la medición de tiempos de viaje y velocidades por los principales corredores viales del casco urbano de Ambato, utilizando la metodología del vehículo flotante (Acevedo, 2011). En el Anexo 3, se puede observar el formulario que se utilizó para registrar los datos tomados en las diferentes intersecciones y corredores que se consideraron en la toma de tiempos.

2.3. Depuración e imputación de datos

Tras tabular los datos y analizarlos, se procedió a realizar la depuración de la información, ya que se encontraron listados con datos repetidos, ausencia de valores en algunas de las franjas horarias, errores en el sentido de las vías, listados sin dirección del nodo aforo y listados con la misma dirección, día y hora de registro. Al tratarse de puntos de concentración de vehículos en lugares conflictivos, se procedió a tomar los listados con los valores de flujo vehicular más altos, a partir de las observaciones realizadas en el sector de interés, hasta tener la información de cada uno de los nodos aforo en una base de datos manejable.

Para realizar un análisis inicial en mayor profundidad, se ha seleccionado un área con siete nodos y mayor densidad de aforos, que contengan datos suficientes para poder realizar el análisis. A esta subred se la denominará red ejemplo y se estudiará en detalle en este capítulo. En ella se puede observar cómo se ha realizado la composición de los valores para los diferentes arcos que, en este caso, son las secciones de vías que conectan

los nodos, como podemos observar en la Figura 2.1 resaltada con fondo color amarillo y se describe en la Figura 2.4.

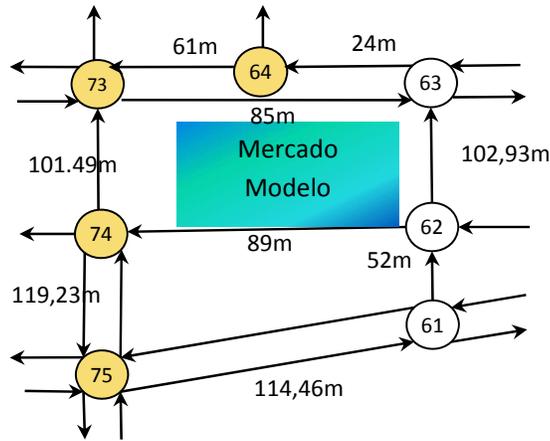
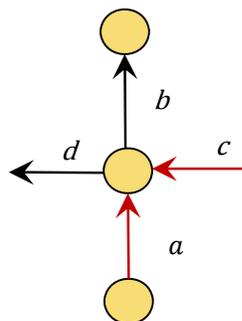


Figura 2.4. Red ejemplo seleccionada para el análisis de información

Debido a que, originalmente, los datos se tomaron en forma de concentración de vehículos de cada nodo, se tomaron en cuenta varias consideraciones para la asignación de datos a cada uno de los arcos de la red, para el caso en el que necesitasen datos en todos los arcos en los estudios, como se describe a continuación.

La imputación de valores se ha realizado según el formato de la Figura 2.5. Para ello, se han asignado porcentajes basados en el conocimiento del sector y en la experiencia al transitar por tales intersecciones, tratando de que se aproximen a la realidad y guarden relación con los datos iniciales. Así, si disponemos de los flujos a y c y queremos predecir el flujo en b , utilizaremos una predicción del estilo:



$$b = pa + qc$$

donde p es la fracción de flujo a que va en la dirección de b ; y q es la fracción de c que va en la dirección de b .

Figura 2.5. Esquema de formulación de imputaciones

Estamos pues aplicando reglas generales de flujos de redes, como la que indica que la suma de flujos de entrada a un nodo debe ser igual a la suma de flujos de salida. Así, según el esquema de la Figura 2.5, si se posee información en los arcos a , c y d , resulta sencillo calcular los valores para el arco restante mediante la fórmula $b = a + c - d$.

En general, tendremos que estimar fracciones p de tráfico que adoptan ciertas rutas. Para ello, procedemos como sigue. Tenemos datos $((x_1, n_1), \dots, (x_m, n_m))$ a las horas h_1, \dots, h_m , donde n_i es el número total de vehículos y x_i el número de vehículos por la vía de interés. A priori, creemos que $p \sim \beta e(\alpha, \beta)$. Se comprueba fácilmente que, bajo el modelo $x_i \sim \text{Bin}(n_i, p)$, resulta que la distribución a posteriori es

$$p|data \sim \beta e\left(\alpha + \sum x_i, \beta + \sum (n_i - x_i)\right)$$

Si necesitamos resumir la información, lo podemos hacer a través de

$$\hat{p}|data = \frac{\alpha + \sum x_i}{\alpha + \beta + \sum n_i}.$$

Bajo condiciones de escasa información podemos hacer,

$$\hat{p}|data = \frac{1 + \sum x_i}{2 + \sum n_i}.$$

A continuación se muestra paso a paso la forma como se imputaron los datos para los arcos de la red ejemplo, según el formato expuesto en la Figura 2.5 y lo expuesto sobre el modelo beta-binomial, véase French y Ríos Insua (2000).

En la red ejemplo, se presentan los nodos aforo de color naranja. Las flechas de color rojo representan los grupos que tomaron los datos en el nodo aforo y el sentido en el que se dirigieron los vehículos en el momento del conteo, como se puede observar en la Figura 2.6. Una vez detectados los datos, su asignación a los arcos se realizó mediante las fórmulas de la Tabla 2.1.

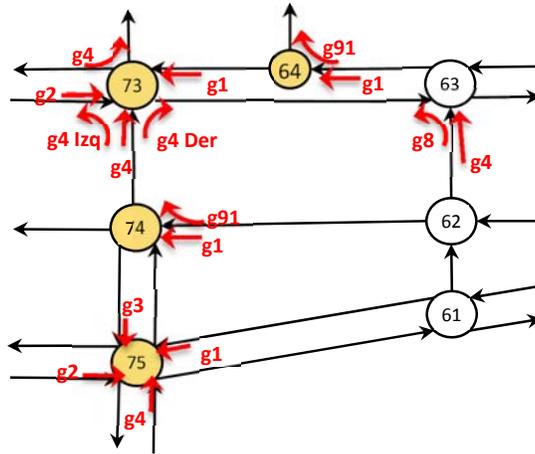


Figura 2.6. Esquema de la red ejemplo con los grupos de datos registrados

Con tales fórmulas, se ha tratado de conservar siempre los datos originales, salvo en casos como la fórmula de los porcentajes, que se han asignado a partir de la experiencia que se posee al transitar por estas intersecciones con la ayuda del modelo beta-binomial antes mencionado. Por ejemplo, en el caso del Arco 75-61, se toma el 50% del grupo g2 sumado al 50% del grupo g4 del nodo 75.

Arcos		Fórmula asignada
61	75	Nodo75(g1)
75	61	Nodo75(g2*0.5 + g4*0.5)
75	74	Nodo75(g1*1/3 + g4*0.5)
74	75	Nodo75(g3)
62	74	Nodo74(g1 +g91)
74	73	Nodo73(g4+g4Der+g4Izq)
73	63	Nodo73(g2+g4Der)
64	73	Nodo73(g1)
63	64	Nodo64(g1+g91)
62	63	Nodo63(g4+g8)

Tabla 2.1. Fórmulas mediante las que se asignaron los valores a los arcos de la red

En el resto de arcos se obtiene la información directamente del grupo correspondiente a la dirección del arco. Por ejemplo, en el Arco 61-75 se obtiene la información del grupo g1 del nodo 75. En otros, se obtiene mediante el sumatorio de los grupos que han realizado el conteo de vehículos que han continuado por el mismo curso, sumando los vehículos que han cambiado su dirección girando a la izquierda o derecha de su sentido original.

Así, por ejemplo, en el caso del Arco 74-73 sus valores salen de la suma de los grupos $g_4 + g_{4lq} + g_{4Der}$ del nodo 74. Se han tomado las mismas consideraciones indicadas para los nodos aforo de la red total. En la Figura 2.7, observamos la composición de los arcos bajo las consideraciones antes indicadas.

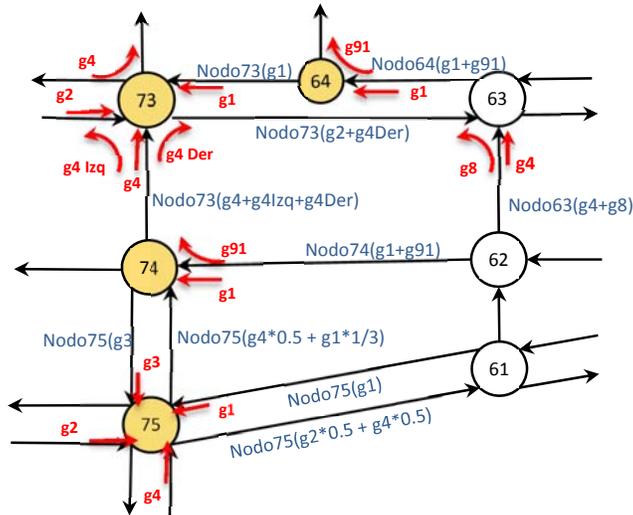


Figura 2.7. Esquema de la red con los nuevos datos en los arcos asignados mediante fórmulas

Se encontraron, además, inconsistencias en la información, tras calcular correlaciones como en la Figura 2.12. Por ejemplo, los valores entre el arco 63-64 que tiene apenas 24m y el arco 64-73 de 61m tenían una correlación muy débil, a pesar de la corta distancia entre ellos.

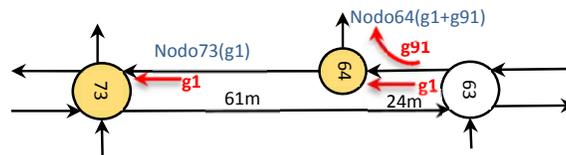


Figura 2.8. Problema encontrado en la cantidad de vehículos entre el arco 63-64 y el arco 64-73

Como muestran la Figura 2.8 y la Tabla 2.2, al encontrar una relación no lógica entre los datos de los arcos 64-73 y 63-74, se procedió a corregirlos. Conociendo que los vehículos que giran por el nodo 64 se aproximan a los valores contabilizados por el grupo g_{91} del mismo nodo, y la cantidad de autos que tiene el grupo g_1 del nodo 73, se ha creado un nuevo grupo de datos para el nodo 63-64 mediante la fórmula $\text{Nodo64}(g_{91}) +$

Nodo73(g1). Este mismo principio se ha tenido también en cuenta con el fin de obtener datos lo más consistentes posibles en nodos en los que se encuentre información inconsistente.

Datos erróneos Nodo73(g1)			Datos corregidos		
	Arco 63-64	Arco 64-73		Nodo 64 + Nodo73 g91 g1	=Arco 63-64
6:45	39	100	6:45	7 100	107
7:00	43	80	7:00	4 80	84
7:15	46	120	7:15	8 120	128
7:30	30	131	7:30	7 131	138

Tabla 2.2. Datos erróneos y datos corregidos del arco 63-64

Finalmente, en algunos casos se identificaron valores inesperados en los casilleros como 0; valores demasiado bajos siendo los restantes altos, sabiendo que es imposible que cambien de esa manera. También se encontró ausencia de valores. Por ello, se procedió a imputar tales datos con la ayuda del modelo beta-binomial antes indicado en el arco y franja horaria que se estén analizando, para no alterar la posible tendencia correspondiente.

2.4. Análisis exploratorio entre arcos y nodos

En esta sección realizamos un análisis entre arcos y nodos de la red ejemplo de los que poseemos datos, con el fin de determinar el nivel de relación que existe entre ellos y, dado el caso que se presente información aparentemente errónea, aplicar las correcciones necesarias para lograr una relación lógica en cada uno de los arcos de la red en estudio.

Correlación entre flujos vehiculares

Con el fin de determinar si los flujos vehiculares entre los diferentes arcos de la red se encuentran estrechamente relacionados o no, y en el caso de tener una relación débil determinar las causas posibles por las que sucede este fenómeno, se puede realizar un análisis de correlaciones entre pares de arcos de la red ejemplo cuyos flujos vehiculares se relacionan directamente, como podemos ver en la Tabla 2.3:

Arco	vs	Arco
75-74	~	74-73
62-74	~	(74-75) + (74-73)
63-64	~	64-73
61-75	~	75-74
74-75	~	75-61

Tabla 2.3. Cuadro de comparaciones a verificar dentro de la red ejemplo

Tras realizar las gráficas correspondientes de los datos indicados en el cuadro de la Tabla 2.3, podemos visualizarlos mejor presentando los resultados de las correlaciones en unidades de vehículos equivalentes por cada 15 minutos, la recta que mejor se ajusta y el factor de correlación. En la Tabla 3 del Anexo 1 se muestran los datos con los que se cuenta en cada uno de los arcos.

La primera relación que se analiza es la de los flujos en los Arcos 75-74 vs 74 73, donde esperamos una relación del tipo

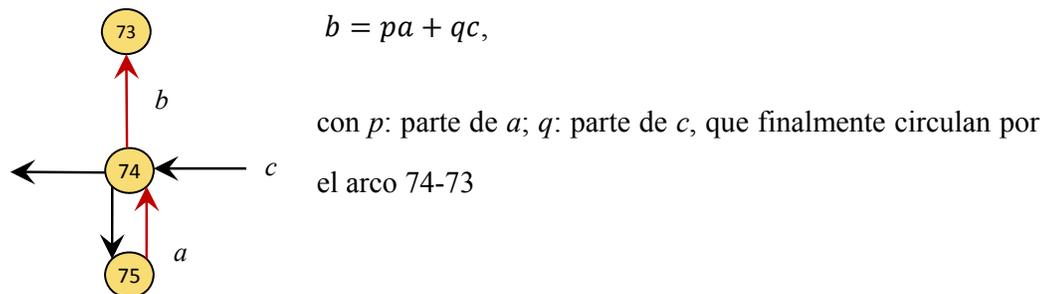


Figura 2.9. Representación de flujos entre los arcos 75-74 vs 74 73

En la Figura 2.10.a se puede observar que la relación entre ambos arcos es alta ($R^2 = 0,72$) y de pendiente positiva, lo que sugiere que, a esa hora, gran parte de los vehículos que se mueven por el arco 75-74 continúan su trayecto por el 74-73. Sin embargo, existe un dato con un valor muy bajo que no concuerda con el resto, seguramente debido a un error en el momento de registrar los datos, por lo que lo reemplaza con la media para un mejor ajuste. Por lo que respecta a las Figura 2.10.b y 2.10.c, presentan pendientes negativas, lo que hace suponer que en estos horarios la mayoría de vehículos busca una salida diferente a la 74-73, seguramente debido a que existe demasiada congestión en el

correspondiente arco, pues en el sector existen paradas de autobuses y gran actividad del Mercado Modelo, sumada a la del garaje existente en el mismo.

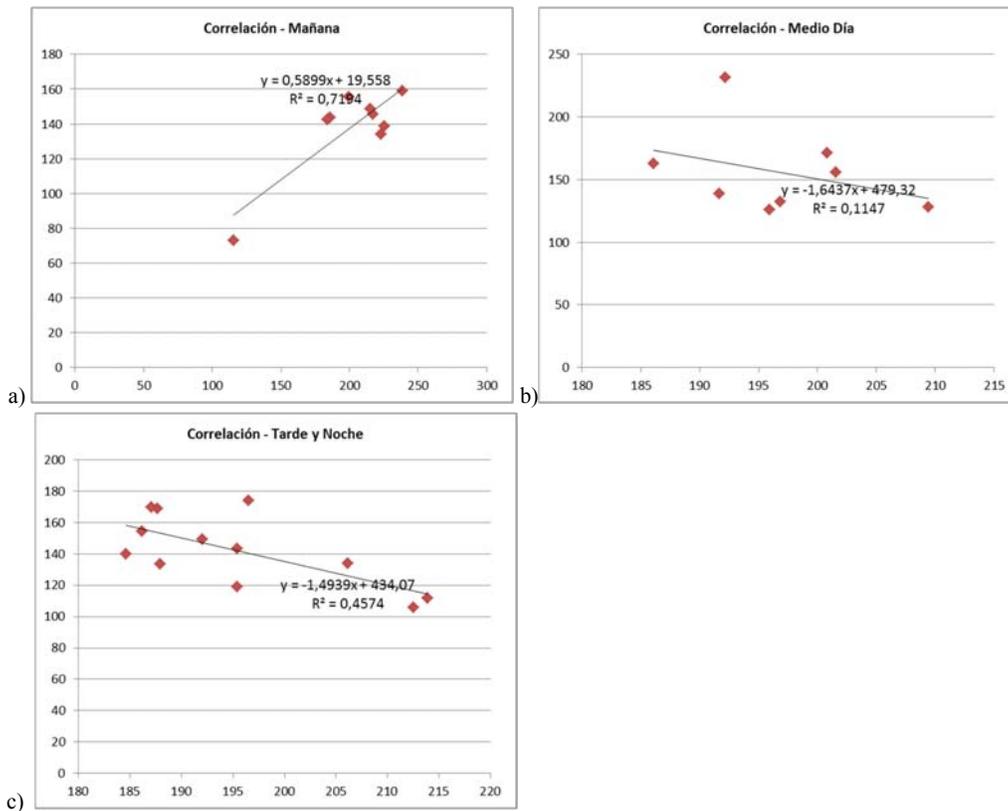
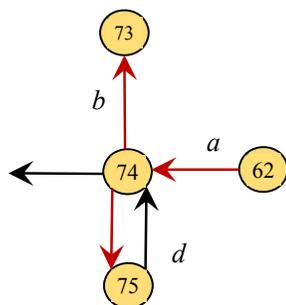


Figura 2.10. Relación entre Arcos 75-74 vs 74-73

Continuando con el análisis, la relación entre los arcos 62-74, respecto de la combinación de los arcos (74-75) y (74-73), se observa en la Figura 2.11, con los flujos a comparar marcados en rojo. Aquí esperamos una relación del tipo:



$$b = p_1a + q_1d$$

$$c = p_2a, \text{ donde}$$

p_1 : fracción1 de a ; p_2 : fracción2 de a ; q_1 : fracción de d

Por lo tanto,

$$b + c = (p_1 + p_2)a + q_1d$$

Figura 2.11. Representación de flujos entre los arcos 62-74 vs (74-75)+(74-73)

Por lo que respecta a la Figura 2.12.a, la correlación es bastante baja, lo que sugiere que los vehículos prefieren tomar una dirección de salida diferente, debido a que en la mañana se suele cerrar una sección por la recolección de basura del mercado de la zona. Se observa en el gráfico de la mañana que los valores de entrada son superiores a 200, mientras que los de salida son inferiores a 200 en su gran mayoría.

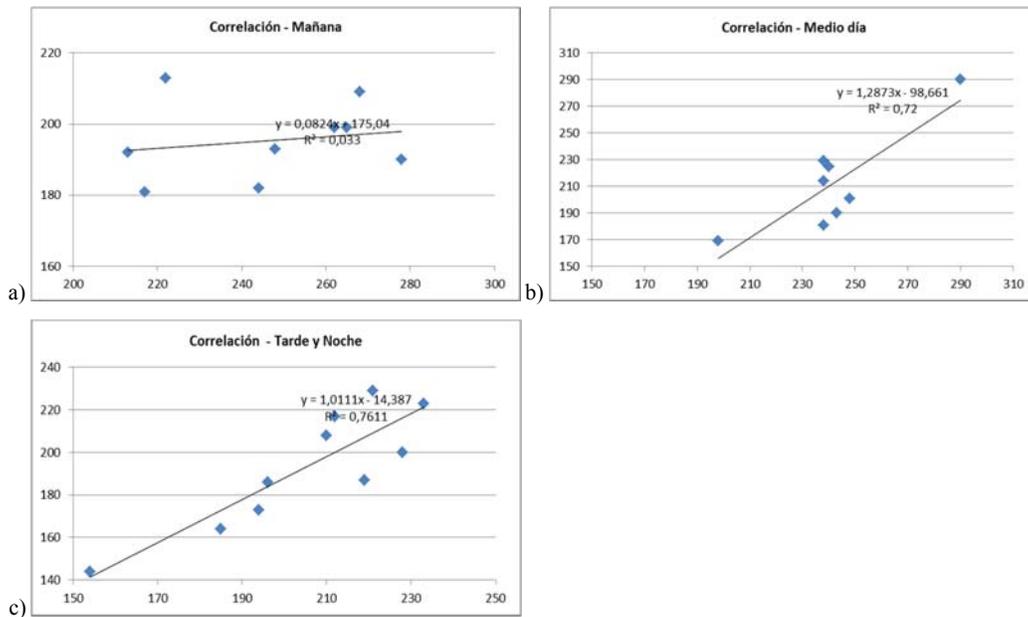


Figura 2.12. Relación entre Arco 63-64 vs 64-73

Respecto de la Figura 2.12.b, el factor de correlación es bastante alto: a medida que ingresen más autos por el arco a, más autos se distribuyen por los arcos b y c, sin buscar necesariamente una salida diferente a éstas. Finalmente, en la Figura 2.12.c el factor de correlación es bastante bajo, pero podemos apreciar visualmente que existe una gran concentración de datos a excepción de dos puntos. Esto hace suponer que, probablemente, se produjo un error al registrar los datos o algún factor que alteró por un lapso corto de tiempo la cantidad de vehículos. Al eliminar tales puntos, la correlación pasa a ser 0.76, apoyando lo que acabamos de indicar.

De la misma manera, analizamos los flujos en los arcos (63-64) y (64-73), representados en la Figura 2.13 con flechas rojas. La información entre ambos arcos debe guardar una

relación directa, dado que el flujo a es igual a una parte del flujo b , ya que en el nodo 64 existe una salida. Esperamos pues, una relación del tipo:

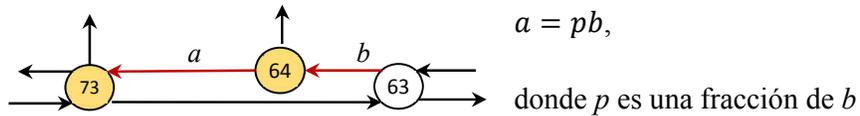


Figura 2.13. Representación de flujos entre los arcos 63-64 vs 64-73

Una vez realizados los gráficos de correlaciones entre ambos arcos, y tras realizar las correcciones indicadas en la Figura 2.8 y la Tabla 2.2, se pudo determinar que, efectivamente, los datos guardan relación directa entre sí, ya que la pendiente es positiva y el factor de correlación es alto, como podemos observar en la Figura 2.14.

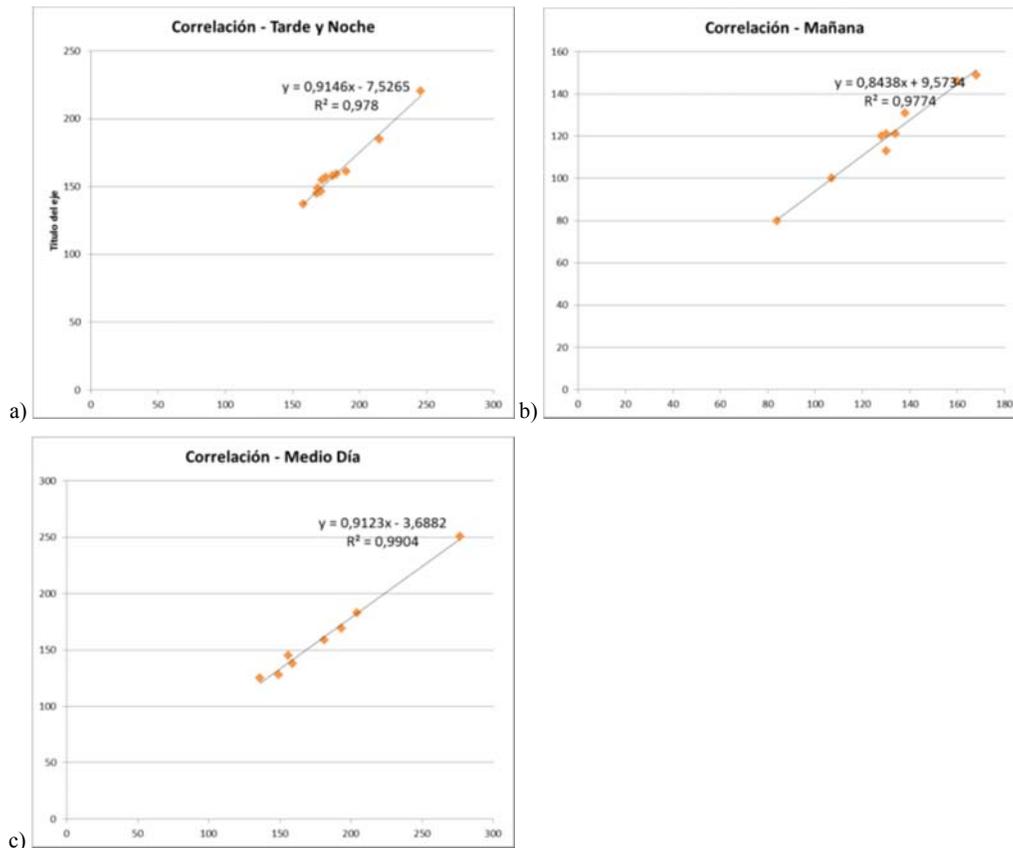
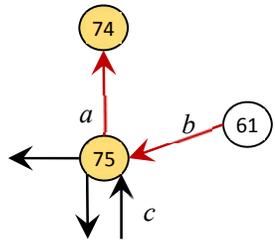


Figura 2.14. Relación entre Arcos 63-64 vs 64-73

La siguiente relación analizada entre los arcos 61-75 y 75-74 viene dada en la Figura 2.15, donde esperamos una relación del tipo



$$a = pb + qc$$

donde p es parte de b y q es parte de c

Figura 2.15. Flujos entre los arcos 61-75 vs 75-74

En las Figura 2.16.a y 2.16.b, observamos correlaciones altas por lo que una buena parte del flujo se distribuye, de hecho, hacia el arco a. En la Figura 2.16.c existe una correlación sumamente baja, lo que indica que, en este horario, el nodo 75 seguramente actúa como vía de salida de la red zona de estudio, lo que es entendible, pues se conecta a una de las principales salidas del casco central de la ciudad.

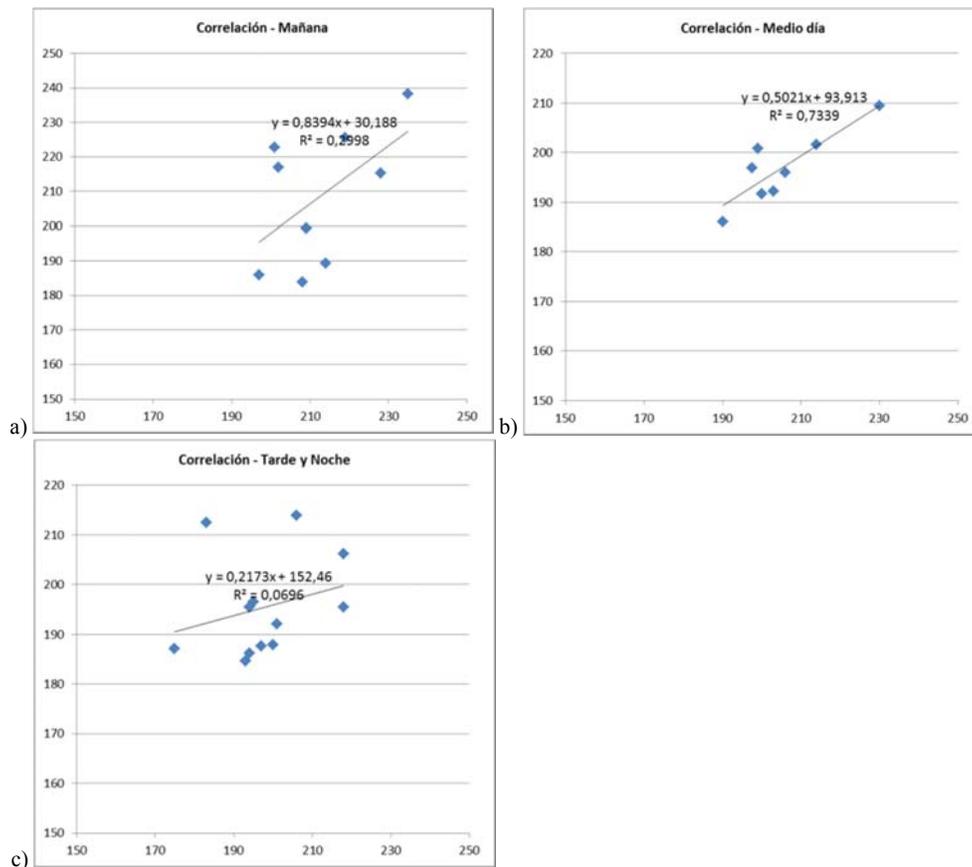


Figura 2.16. Relación entre arcos 61-75 vs 75-74

Finalmente, se analiza la relación entre los tráficos en los Arcos 74-75 y 75-61, donde esperamos una relación del tipo

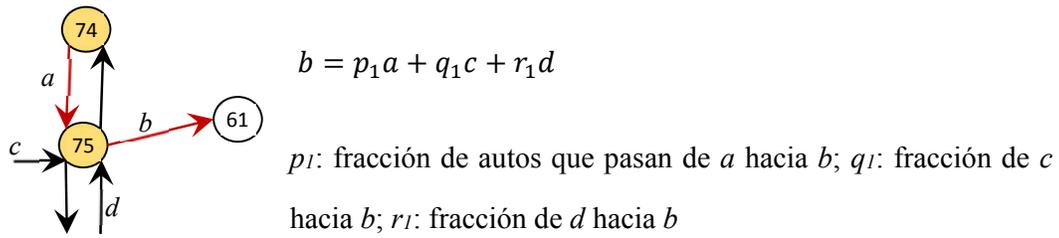


Figura 2.17. Flujos entre los arcos 74-75 vs 75-61

Al realizar las gráficas de correlación se encontró que las tres franjas horarias tienen pendientes negativas, con correlación bastante débil, en especial en la Figura 2.18.a. Esto sugiere que los arcos a y b parecen no tener incidencia el uno respecto del otro, apoyando lo indicado en el anterior análisis de arcos, que el nodo 75 actúa, de hecho, como nodo de salida y entrada de vehículos en la red.

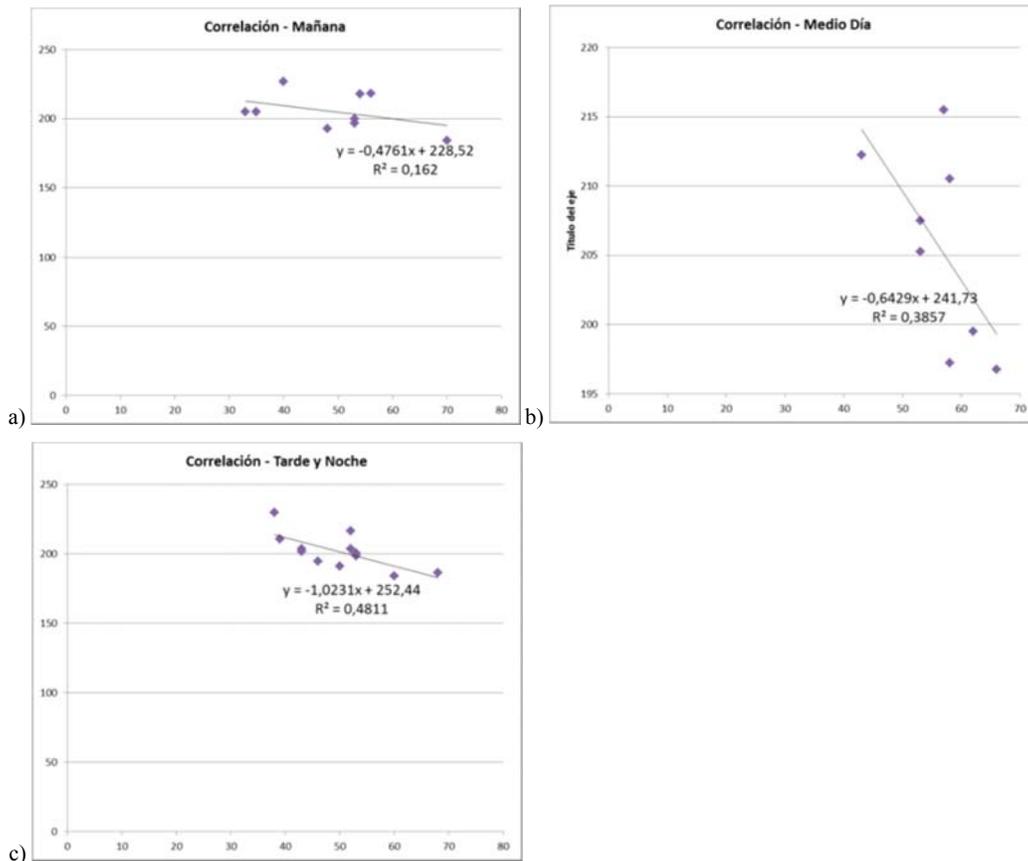


Figura 2.18. Relación entre los arcos 74-75 vs 75-61

2.5. Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica de análisis exploratorio de datos. Su objetivo es la síntesis de información, por reducción del número de variables. Una componente principal es una combinación lineal de las variables originales, véase Hair et al (1987).

Como veremos, podemos utilizar ACP sobre datos de flujo de tráfico para identificar las zonas más complicadas de tráfico en una red. De esta manera, se pueden establecer los nodos de mayor flujo, al igual que los nodos que actúan como puntos de salida o entrada de una sección de red. Así, podríamos detectar los denominados puntos calientes (nodos de mayor influencia) que son los que mayor atención requerirán dentro del estudio de tráfico. Aplicamos estas ideas a los datos de la red ejemplo.

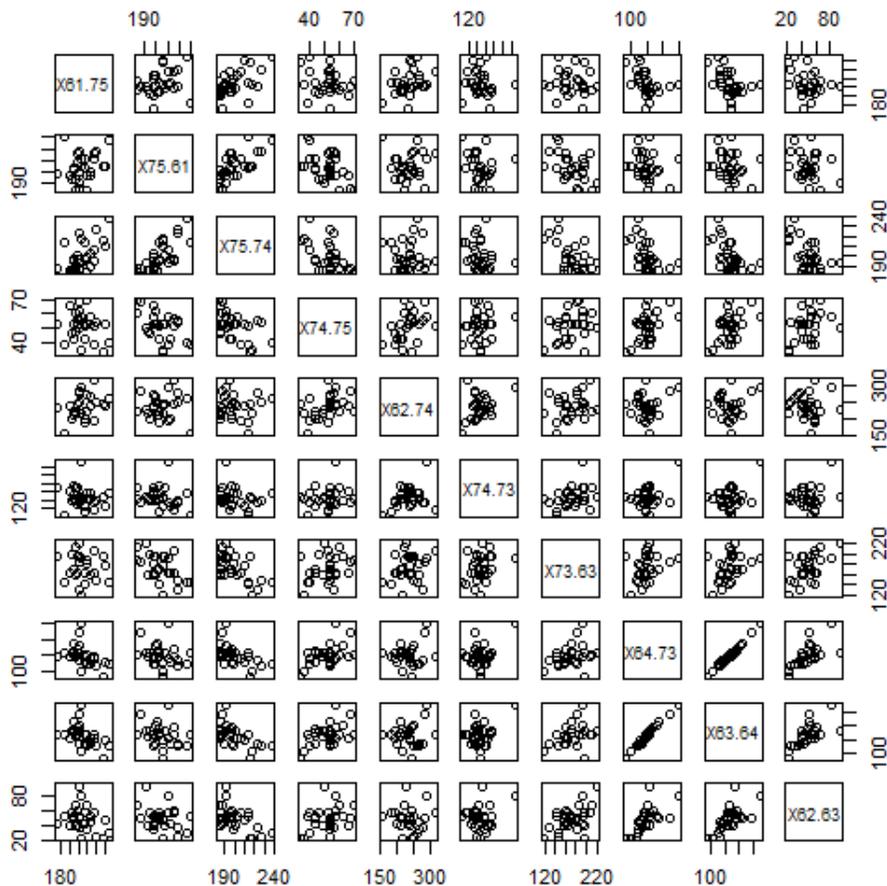


Figura 2.19. Matriz de gráficas de relaciones de los arcos de la red ejemplo

Inicialmente, tenemos la matriz de datos de la Tabla 3 del Anexo 1. Sin embargo, se han eliminado los valores del período establecido entre las 6:30 a 6:45 ya que menos del 5% de los listados de datos contienen valores o se encuentran a 0. Procedemos entonces a realizar un ACP sobre los restantes datos. En la Figura 2.19, podemos observar las relaciones entre los flujos de los arcos de la red ejemplo. Si bien es cierto que en la sección 2.3.2 ya se han explicado varias de las correlaciones, aquí se muestran detalladamente todas las relaciones entre sus arcos para determinar su nivel de dependencia.

La Figura 2.20 contiene los resultados del ACP, e incluye las proporciones de varianza explicadas por las componentes. En nuestro caso, parece razonable quedarse con las tres primeras componentes, ya que con ellas se explica el 72% de la varianza. La matriz de cargas correspondiente se muestra en la Tabla 2.4.

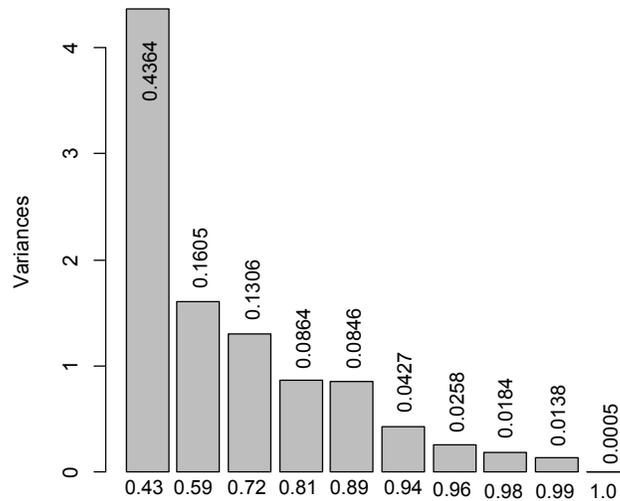


Figura 2.20. Gráfico de porcentajes de varianza explicada por componentes principales

Arco	PC 1	PC 2	PC 3
X61.75	0,24	0,50	-0,11
X75.61	0,28	0,08	0,62
X75.74	0,39	0,18	0,31
X74.75	-0,32	0,24	-0,11
X62.74	-0,08	0,72	0,03
X74.73	-0,22	0,31	0,09
X73.63	-0,31	0,17	-0,33
X64.73	-0,40	0,01	0,44
X63.64	-0,41	-0,01	0,42
X62.63	-0,35	-0,10	0,12

Tabla 2.4. Matriz de resultados de las componentes principales elegidas

Para poder interpretarlos mejor, a continuación presentamos las siguientes gráficas de la red con flechas de color azul para cargas positivas, rojo para cargas negativas, no representándose las cargas cercanas a cero, como indica la Tabla 2.4.

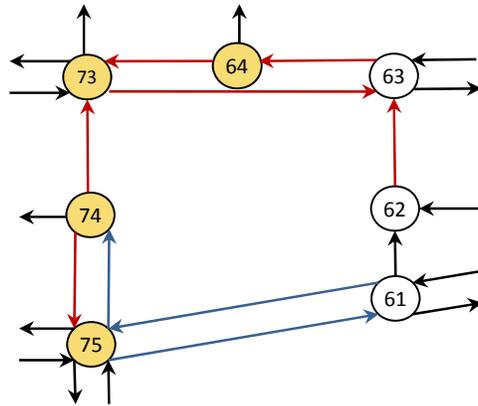


Figura 2.21. Red ejemplo - primera componente

Como se observa en la Figura 2.21, la primera componente tiene relación positiva con los arcos referidos al nodo 75, lo que sugeriría una gran demanda vehicular en ese nodo: tres de los cuatro arcos tienen alta circulación vehicular que influye en la red; el arco restante sólo actúa como vía de salida de la misma. Además, mantiene relación negativa alta con el resto de nodos, lo que sugeriría que los correspondientes vehículos provienen de otras entradas a la red y que el nodo 75 actúa, de hecho, como nodo de salida.

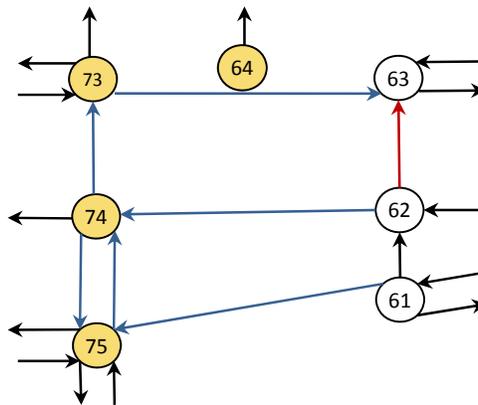


Figura 2.22. Red ejemplo - segunda componente

Por su parte, la segunda componente principal guarda alta relación positiva con cuatro de los arcos que eran negativos en la primera componente. Por lo que respecta a cargas negativas, los valores son cercanos a 0, salvo uno de ellos. Se podría interpretar, por tanto, esta componente como un flujo medio de la red.

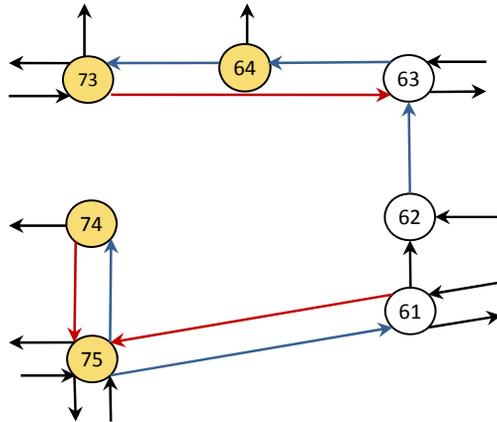


Figura 2.23. Red ejemplo – tercera componente

Finalmente, la tercera componente tiene alta relación con los datos que se refieren a movimientos hacia y desde los nodos 73 y 75, actuando como principales fuentes de entrada y salida de vehículos en la red ejemplo.

Se concluye así que los datos de flujo en la red ejemplo se resumen mediante tres variables que interpretan lo que está sucediendo dentro de la misma, en especial hacia y desde los nodos 75 y 73, que serían los más relevantes desde el punto de vista de la variabilidad del tráfico, sugiriendo zonas donde se podría actuar para mejorar la situación.

2.6. Modelos de Predicción

2.6.1. Series temporales

Introducimos en esta sección una clase de modelos de análisis de series temporales que nos permitirán obtener predicciones de los flujos vehiculares en los diferentes arcos de la red y estados de saturación.

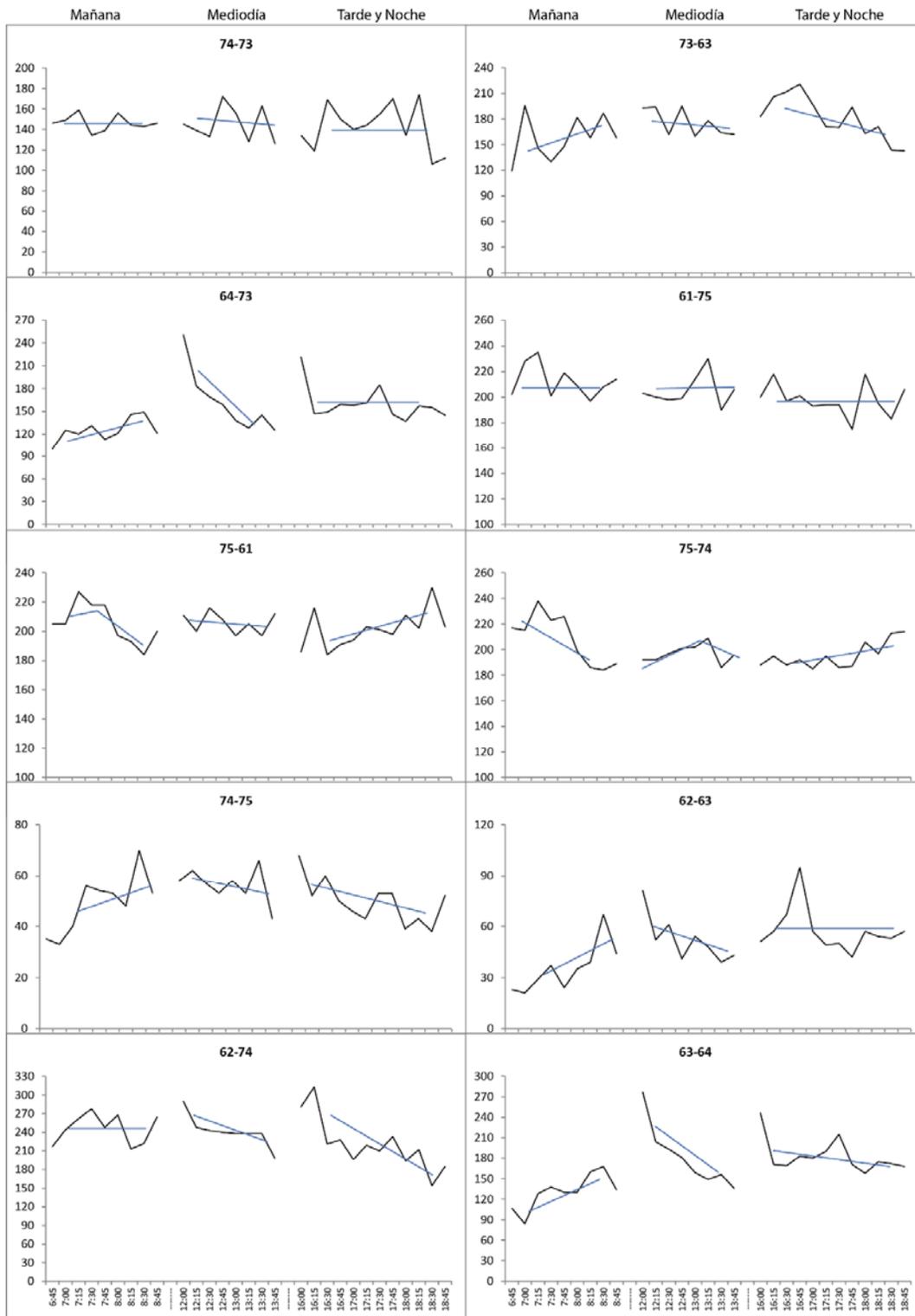


Figura 2.24. Gráfico de series temporales para cada uno de los arcos de la red ejemplo

En la Figura 2.24, se muestran las líneas de tendencia y comportamiento de los flujos de cada uno de los arcos de la red ejemplo en las tres bandas horarias. Esto proporciona

información valiosa que ayudará a seleccionar los modelos de predicción adecuados. Obsérvese la evolución de las series y las diferencias entre ellas dentro de cada arco y entre los distintos arcos.

Dado el carácter de las series, se ha creído conveniente aplicar modelos dinámicos lineales (MDLs), de tendencia o polinómicos para realizar predicciones del flujo vehicular en los arcos de la red objeto de estudio. West y Harrison (2005) y Petris et al (2009) proporcionan introducciones detalladas a este tipo de modelos. El software empleado es el paquete dlm de Petris, disponible en R.

2.6.2. Modelos Dinámicos Lineales

La modelización matemática de procesos de series temporales se basa en modelos dinámicos, es decir, referidos a cambios en tales procesos debido al paso del tiempo como fuerza motriz fundamental.

Los modelos lineales clásicos se escriben habitualmente en términos de la ecuación

$$Y = F'\theta + v,$$

donde Y es el vector respuesta, F' es la matriz de variables regresoras o independientes, θ es un vector de n parámetros desconocidos y v es el vector de errores. Si se quiere dar un sentido dinámico al sistema anterior, se ha de poder variar los elementos del modelo con el paso del tiempo t y permitir que el conjunto de parámetros θ evolucione, a su vez, con el tiempo. La evolución toma entonces la forma de un proceso de Markov de primer orden, véase Petris et al (2009) . De este modo, se podría escribir un modelo dinámico lineal (MDL) normal general según

$$\begin{aligned} Y_t &= F'_t \theta_t + v_t & Y_t | \theta_t &\sim N(F'_t \theta_t, V_t) \\ \theta_t &= G_t \theta_{t-1} + w_t & \theta_t | \theta_{t-1} &\sim N(G_t \theta_{t-1}, W_t) \\ \theta_0 | D_0 &\sim N(m_0, C_0) \end{aligned}$$

que vendrá caracterizado mediante

$$\{F_t, G_t, W_t, V_t\}$$

donde, para cada instante t de tiempo, F_t es un vector conocido de dimensión $n \times 1$, G_t es una matriz conocida $n \times n$, V_t es una varianza conocida y W_t es una matriz de varianzas conocida $n \times n$.

El modelo específico a utilizar en nuestro problema de predicción de tráfico a corto plazo es un MDL de crecimiento lineal, que es un modelo de espacio de estados con ecuaciones:

$$\begin{aligned} Y_t &= \mu_t + v_t, & v_t &\sim N(0, V), \\ \mu_t &= \mu_{t-1} + \beta_{t-1} + w_{t,1}, & w_{t,1} &\sim N(0, \sigma_\mu^2) \\ \beta_t &= \beta_{t-1} + w_{t,2}, & w_{t,2} &\sim N(0, \sigma_\beta^2) \end{aligned}$$

Cuando β está muy concentrado en torno a 0, el modelo lineal polinómico es de orden 1 (como en el arco 74-73, por la mañana). En caso contrario, es de orden 2 (como en el arco 75-61, horario en la tarde).

2.6.3. Aplicación de los MDLs a la red ejemplo

En la Figura 2.24 hemos podido visualizar las líneas de tendencia que sugieren si el nivel de la componente polinómica es de primer o segundo orden.

Como ejemplo, se toman los datos del arco 75-61 de la Figura 2.24. Según sus líneas de tendencia, en el horario de la mañana parece de segundo orden, mientras que en los horarios del mediodía y tarde y noche parecen de primer orden. Los valores para W y V utilizados en el MDL se han determinado por máxima verosimilitud mediante la rutina `dmlMLE` del paquete `dml`; el valor inicial de m_0 es igual a la media del vector de datos de la banda horaria correspondiente j y, finalmente, la C_0 inicial, la varianza de los mismos. Aplicando el paquete `dml` de R, se han obtenido los siguientes modelos y gráficos.

Horario de la mañana (6:45 - 7:00 - 7:15 - 7:30 - 7:45 - 8:00 - 8:15 - 8:30 - 8:45)

Se puede observar en la Figura 2.25.a la serie temporal de los datos de la mañana, mientras que la Figura 2.25.b muestra su función de autocorrelación que sugiere la línea de tendencia de orden 2 indicada en la Figura 2.24 para el arco 75-61 en el horario de la

mañana. En la Figura 2.26 se muestran los valores predichos marcados en color gris que siguen una evolución similar a los valores originales, en color negro, mostrando una buena capacidad predictiva.

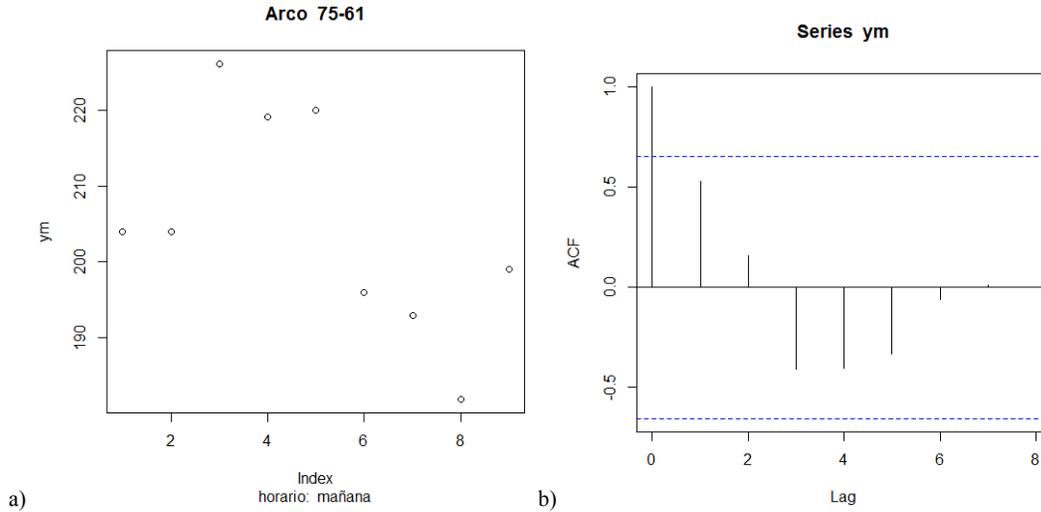


Figura 2.25. Gráfica de datos y ACF (mañana)

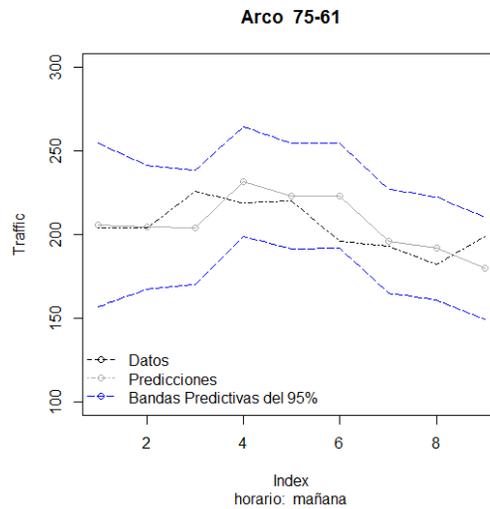


Figura 2.26. Datos y gráfica de datos obtenidos al aplicar el DLM (mañana)

Horario del mediodía (12:00 – 12:15 – 12:30 – 12:45 – 13:00 – 13:15 – 13:30 – 13:45)

En la Figura 2.27.a se muestran los datos tomados en la banda horaria del mediodía. En la Figura 2.27.b se muestra la función de autocorrelación. Sugieren que la línea de tendencia es de orden 1 para este horario.

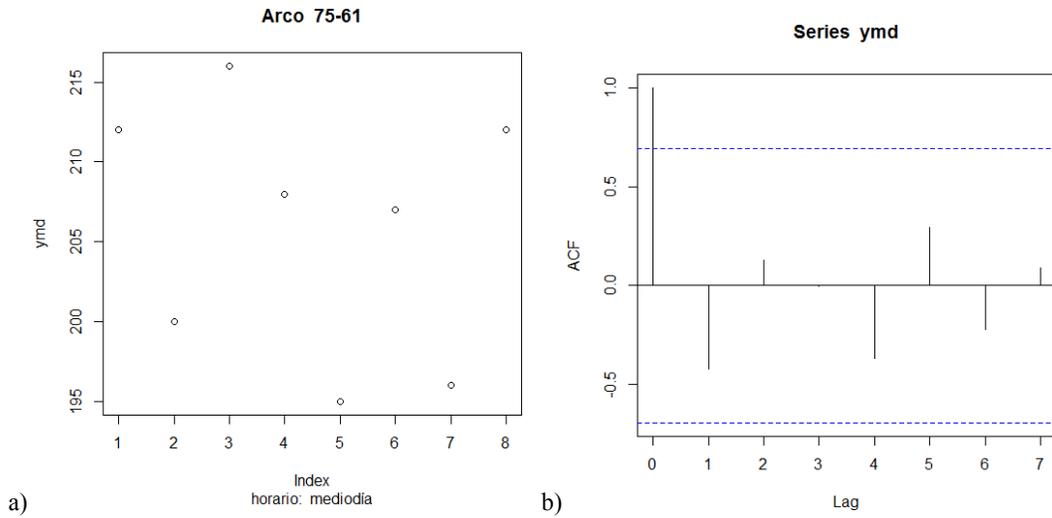


Figura 2.27. Gráfica de datos y ACF (mediodía)

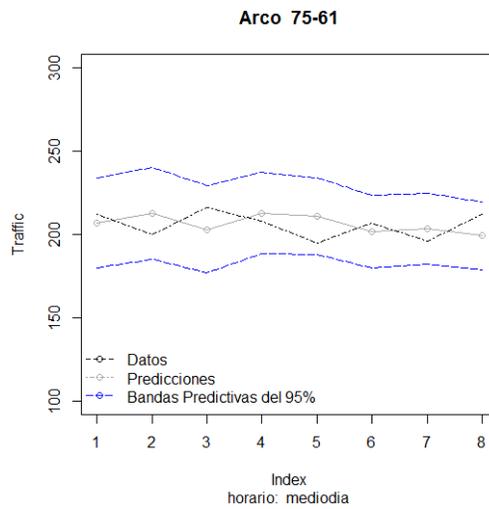


Figura 2.28. Datos y gráfica de datos obtenidos al aplicar el DLM (mediodía)

En la Figura 2.28 se muestran los datos obtenidos mediante el modelo de predicción para el horario del mediodía, siendo los datos originales, color negro, la cantidad de vehículos predichos por el modelo para el siguiente cuarto de hora (color gris) y, finalmente, las bandas predictivas del 95%, color azul, ajustándose de manera adecuada a la línea de tendencia indicada en la Figura 2.24.

Horario de la tarde y noche (16:00 – 16:15 – 16:30 – 16:45 – 17:00 – 17:15 – 17:30 – 17:45 – 18:00 – 18:15 – 18:30 – 18:45)

En la Figura 2.29.a, se muestran los datos de la banda horaria tarde y noche, mientras que en la Figura 2.29.b se muestra la función de autocorrelación.

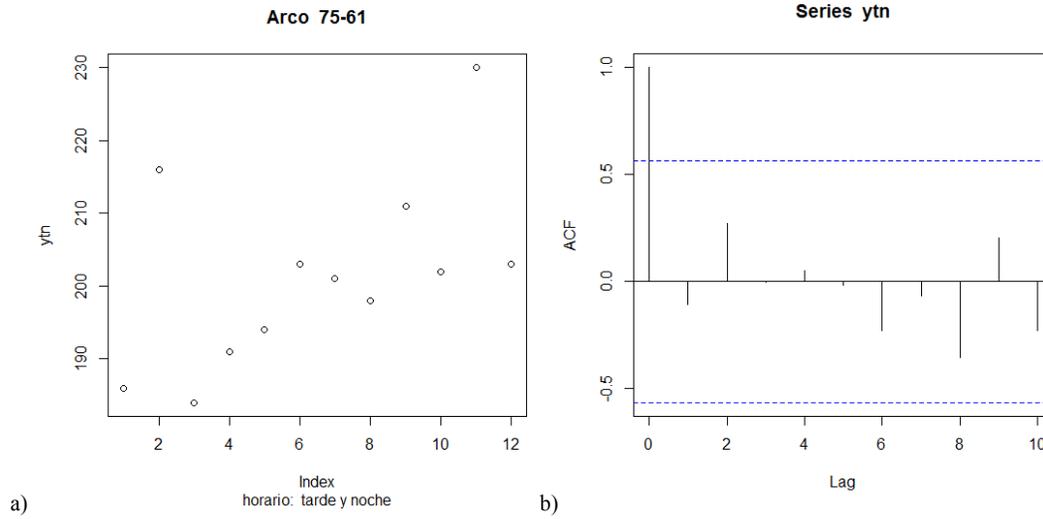


Figura 2.29. Gráfica de datos y ACF (tarde y noche)

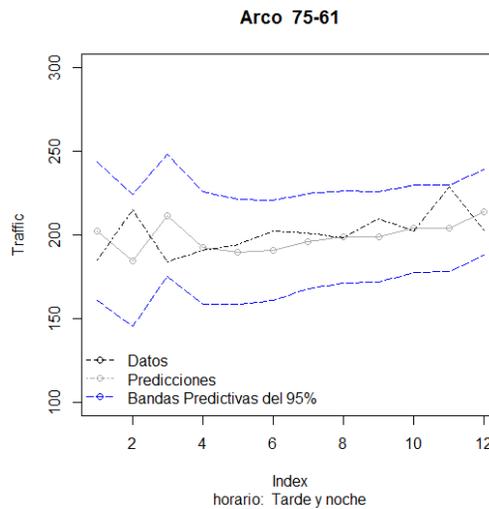


Figura 2.30. Datos y gráfica de datos obtenidos al aplicar el DLM (tarde y noche)

La Figura 2.30 muestra los datos y gráfico obtenido con el MDL para el horario de tarde y noche, donde los datos originales están en color negro, los datos predichos para los

siguientes 15 minutos en color gris y, en color azul, las bandas predictivas al 95% sugiriendo, de nuevo, un buen ajuste.

Como se ha podido observar en los tres gráficos anteriores, el modelo dinámico lineal genérico utilizado se ajusta de manera satisfactoria para predecir las cantidades de vehículos que circularían en los siguientes períodos de tiempo (15 minutos). De manera similar, y bajo las mismas condiciones, se aplican al resto de arcos para realizar y utilizar las correspondientes predicciones, así como para predecir a 30, 45, 60 minutos, ..., o más, según se precise.

2.6.4. Predicción de la saturación

Uno de los usos más relevantes del MDL anterior es el de la predicción de la saturación en las correspondientes vías. Para hacer tales predicciones es necesario calcular la capacidad que tiene cada arco, que dependerá de las condiciones viales (fundamentalmente, número de carriles que posea cada uno de ellos), la longitud media de los vehículos y la distancia prudencial que debe mantenerse entre los mismos.

Se define, en general, como capacidad de una vía a la máxima intensidad horaria de personas o vehículos al atravesar un tramo uniforme de un carril o calzada durante un período definido de tiempo bajo las condiciones prevalecientes viales, el tráfico y los sistemas de regulación, véase National Research Council (2000). El período de tiempo utilizado en la mayoría de los análisis de capacidad es de 15 min, debido a que se considera que es el intervalo más corto en el que se puede presentar un nivel de circulación estable. De hecho, coincide con el período de conteo empleado por la DTM en Ambato.

Como hemos dicho, la capacidad se define para las condiciones prevalecientes viales, del tráfico y de los sistemas de control, que deben ser sensiblemente uniformes en cualquier tramo y período analizado. Cualquier variación de las condiciones implicaría un cambio en la capacidad de la estructura vial. Para ello, el Reglamento General para la Aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial y sus ordenanzas

de tránsito, en su reglamento técnico, indican que los autos que circulan dentro de la zona urbana en movimiento deberían mantener una distancia prudencial mínima de 3 metros con respecto al vehículo al que antecedan en el mismo carril, de forma que le permita detenerse con seguridad ante cualquier emergencia. Cuando estén detenidos por algún elemento fijo que produzca interrupciones periódicas en la circulación vial como semáforos, rotondas, etc., la distancia prudencial es de 2 metros.

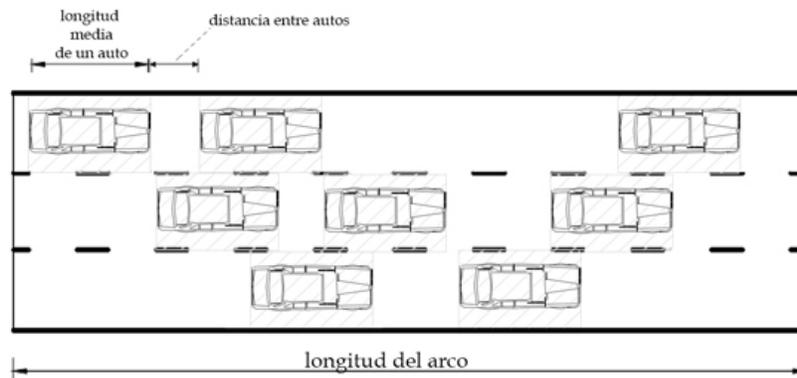


Figura 2.31. Representación de un arco de la red vial con 3 carriles

Finalmente para vehículos aparcados, la distancia prudencial es de, al menos, 1 metro. Adicionalmente, existen ordenanzas que establecen los límites máximos de velocidad permitidos según la zona por la que se circule. Se establece que para vehículos livianos, motocicletas y similares que circulen dentro del perímetro urbano, la velocidad máxima permitida es de 50 km/h. Para vehículos de transporte público de pasajeros, al igual que de transporte de carga, se establece en 40 km/h.

Para hacer el cálculo de flujo máximo en cada arco, considerando que la capacidad de un carril es el máximo número de vehículos que puede pasar por él, y suponiendo velocidad uniforme, generalmente expresada en vehículos/hora, la capacidad C sería

$$C = \frac{v}{s} 1000,$$

donde

v : velocidad en km/h,

s : separación media mínima en metros entre las partes frontales o traseras de dos vehículos sucesivos.

Las variables v y s no son independientes. El valor de s es función de la longitud de los vehículos, del tiempo de reacción de los conductores y de la distancia de frenado, pudiendo expresarse en función de v mediante una fórmula del tipo

$$s(v) = a + bv + cv^2.$$

El término independiente (a) se suele relacionar con la longitud de los vehículos, el término (bv) con el tiempo de reacción de los conductores y (cv^2) con la distancia de frenado. En un estudio realizado en Inglaterra, Smeed (1949) encontró la siguiente fórmula para la separación

$$s(v) = 8 + 0.2v + 0.003v^2$$

Reemplazando s en la fórmula de la capacidad C tendríamos:

$$C(v) = \frac{v}{8 + 0.2v + 0.003v^2} * 1000$$

Cuando la velocidad en marcha de un vehículo se encuentra por debajo de 25km/h se vuelve incómoda para el conductor. Según uno de los informes de los estudios realizados por Acevedo (2011) y entregados al GAD-MA, se indica que la velocidad más baja registrada en el casco urbano en el horario de la mañana es de 5km/h como se puede observar en la Tabla 2 de los Anexos, por lo que hemos decidido emplear ésta velocidad obteniendo los flujos máximos de vehículos equivalentes para los tramos de vía de red. Así, obtendríamos que:

$$C(5) = \frac{5}{8 + 0.2(5) + 0.003(5)^2} * 1000 = 552 \text{ vehiculos/hora}$$

Finalmente, como tenemos contabilizados los vehículos cada 15 minutos, entonces dividimos C por 4 y multiplicamos por el número de carriles, para obtener el valor de la

capacidad para cada segmento de calle. Además, si consideramos 70% como nivel de saturación para cada arco, resultarían los correspondientes niveles de saturación según indica la Tabla 2.5.

Arco	# de carriles	Flujo máximo	70% capacidad
74 - 73	2	276	193.2
73 - 64			
64 - 73			
64 - 63			
61 - 75			
75 - 61			
75 - 74			
74 - 75			
63 - 64			
62 - 63	1	138	96.6
62 - 74			

Tabla 2.5. Niveles de saturación para los arcos de la red ejemplo

Las probabilidades de saturación se calcularían entonces mediante

$$\Pr(Z > 0,7f|datos),$$

donde $Z|datos$ describe la distribución predictiva del MDL correspondiente y f el flujo máximo. Los valores de probabilidad de saturación para algunos arcos pueden observarse en la Figura 2.32. La primera indica que el arco 62-63 se tiene una probabilidad muy baja de saturación, pues el valor máximo que alcanza es de 0,5 en los dos primeros cuartos de hora del horario de la mañana, mientras que en el resto de períodos la probabilidad es muy cercana a 0. Respecto al arco 62-74, se puede observar todo lo contrario: en los dos primeros períodos de tiempo la probabilidad de saturación es de 0.5, mientras que en el resto de los períodos indica que muy probablemente estará saturado, con una probabilidad muy cercana a 1. Deberíamos, en consecuencia actuar de alguna manera sobre el mismo.

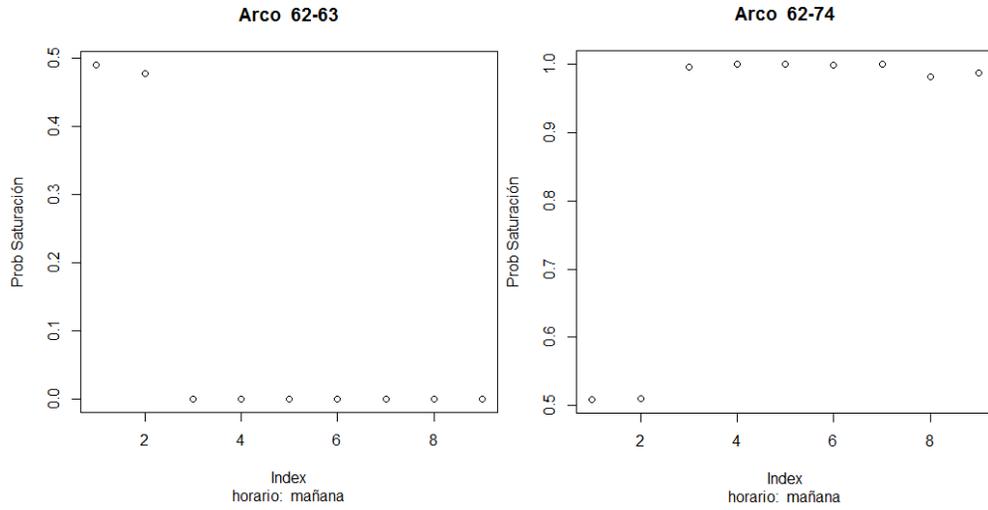


Figura 2.32. Gráfico de probabilidades de saturación

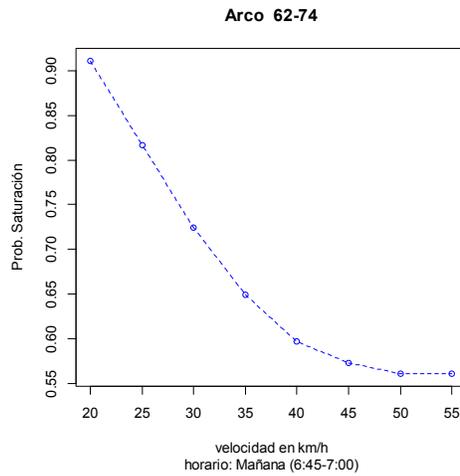


Figura 2.33. Curva de saturación Velocidad vs $Pr(Z > 0.7C(v))$

También puede ser interesante representar la curva de saturación en función de la velocidad, que definimos mediante

$$g(v) = Pr(Z > 0.7 * C(v)|datos)$$

y se representa en la Figura 2.33 para el arco 62-74 en el horario de la mañana para uno de los períodos de 15 minutos (6:45-7:00).

2.7. Flujos Origen-Destino Dinámicos

En la sección 2.6 hemos introducido una clase de modelos que permite predecir los flujos de tráfico en una localización de la red, dados los datos de flujos anteriores en el mismo punto. Esto permite predecir a corto plazo la saturación en tales puntos y, en consecuencia, adoptar actuaciones en los mismos cuando predecimos saturación. Sin embargo, no aportan información global sobre el conjunto del tráfico en la red y, en particular, en las rutas principales de la misma.

Para paliar este problema podemos introducir el concepto de flujos de orígenes a destinos (OD) de la red dinámicos, intentándolos estimar a partir de los flujos de tráfico en algunos de sus tramos. El problema consiste en, dados los flujos $Y=(Y_1, \dots, Y_r)$ observados en r tramos, inferir los flujos $X=(X_1, \dots, X_c)$ en los c pares OD relevantes en la red. Podemos relacionar Y y X definiendo la matriz de enrutamiento $A=(a_{ij})$, donde $a_{ij} = 1$, si el tramo i está en la ruta OD j , y 0, en otro caso. Se tiene, entonces, la relación

$$Y = AX$$

$$X \geq 0.$$

Como, normalmente, r será mucho menor que c , el sistema tendrá infinitas soluciones. El objetivo será, entonces, dada la observación $Y=y$, encontrar la distribución de $p(X|y)$, bajo hipótesis distributivas adecuadas.

De entre los numerosos modelos para este propósito, véase, por ejemplo, Vardi (1996), Tebaldi y West (1998) o Castillo et. al (2008), nosotros adaptaremos este último, por utilizar distribuciones normales, propias de nuestro contexto de DLMS. Así, las hipótesis que hacemos son:

- Los flujos OD X siguen una distribución normal c -variante $X \sim N(\mu, \Sigma)$.
- El flujo Y_a en el enlace a -ésimo, $a = 1, \dots, r$, sigue una distribución normal

$$Y_a | X \sim N \left(\sum_{i \in \pi_a} \beta_{ai} X_i, \varphi_a^2 \right)$$

donde π_a designa las rutas OD que contienen al enlace a -ésimo.

Además, podríamos acomodar en nuestro esquema distribuciones sobre las ponderaciones β (y sobre los parámetros φ_a^2, μ y Σ), pero haremos una presentación simplificada.

Nuestro objetivo, como hemos dicho, es conseguir la distribución de $X|y$. Obsérvese que dadas las hipótesis de normalidad y combinación lineal de antecesoros, podríamos calcularlas de forma analítica. Se tiene de hecho que, si escribimos

$$Y|X \sim N(\beta, \Sigma_1),$$

$$\text{con } \Sigma_1 = \begin{pmatrix} \varphi_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \varphi_r^2 \end{pmatrix}, \text{ resulta}$$

$$X|y \sim N(\mu^*, \Sigma^*)$$

con

$$(\Sigma^*)^{-1} = \Sigma^{-1} + \beta' \Sigma_1^{-1} \beta$$

$$(\Sigma^*)^{-1} \mu^* = \Sigma^{-1} \mu + \beta' \Sigma_1^{-1} y.$$

Sin embargo, en problemas de alta dimensión puede ser más eficiente emplear métodos MCMC. Para ello, escribimos la distribución conjunta del modelo

$$f(x) \Pi_a f(y_a | x).$$

A partir de ella, es fácil comprobar que, como ilustraremos en un ejemplo posterior, si x_{-i} designa a $(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_r)$, $f(x_i | x_{-i}, y)$ es normal, con lo que podemos crear el siguiente muestreador de Gibbs, véase, por ejemplo, French y Rios Insua (2000):

$j=0$
 Inicializar $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_r^0)$
 Hasta detectar convergencia hacer
 {
 Generar $x_1^{j+1} \sim X_1 | x_2^j, \dots, x_r^j, y$
 Generar $x_2^{j+1} \sim X_2 | x_1^{j+1}, x_3^j, \dots, x_r^j, y$
 :
 }

$$\left. \begin{array}{l} \text{Generar } x_r^{j+1} \sim X_r | x_1^{j+1}, \dots, x_{r-1}^{j+1}, y \\ j=j+1 \end{array} \right\}$$

Una vez detectada la convergencia a partir de la iteración n –ésima, $(x_i^{n+1}, \dots, x_i^{n+M})$ constituye una muestra aproximada de $X_i | y$, de tamaño M , para $i = 1, \dots, r$.

Obsérvese que, en nuestro caso, disponemos en cada período t de interés de la distribución predictiva

$$p(y_t),$$

procedente de un MDL. Entonces, para una muestra $\{y_t^m\}_m$ podemos generar una muestra de $X_i | y_t^m$ que denominaremos *flujo OD dinámico i-ésimo*. De hecho, de esta muestra podemos quedarnos con una observación x_i^m de $X_i | y_t^m$, para obtener una muestra $\{x_i^m\}$ de la predictiva de X_i , que podemos emplear para hacer predicciones de saturación en los tramos y rutas OD. Así, si a_j designa al vector característico del tramo j -ésimo de la red,

$$\{a_j x_i^m\}$$

es una muestra del volumen predicho de tráfico en ese tramo en ese período. De esta forma, si δ es la capacidad del tramo de interés, estimamos la probabilidad predictiva de saturación en tal período mediante

$$\frac{\#\{a_j x_i^m \geq 0.7 \delta\}}{\#\{a_j x_i^m\}},$$

indicando que el tramo tiene una alta probabilidad de saturación si tal estimación es alta.

En forma análoga, podemos hablar de saturación del tráfico en la ruta OD. Para ello, si una ruta OD pasa por los tramos i_1, i_2, \dots, i_s , podemos generar a través del método anterior una muestra de las distribuciones de tráfico $z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_j}$ en cada uno de los tramos y, por ejemplo, estimar $P(z_{i_j} \geq 0.7 \delta_j, j = 1, \dots, s)$ para tener una idea de la saturación conjunta en la ruta.

Igualmente, podríamos proceder con el conjunto de la red.

2.7.1. Aplicación

Como en las secciones anteriores, aplicaremos el método propuesto a la red ejemplo. Dado que existen 7 nodos, potencialmente se dan $7(7-1) = 42$ pares OD. Sin embargo, un análisis de direcciones viales permitidas reduce las posibilidades a sólo 28 pares. De éstas, se han excluido aquellos que afectan a un sólo tramo, por ser cortos y no ser necesario usar el vehículo, con lo que se reducen a 17. Finalmente, basados en la información aportada por el análisis de componentes principales de la Sección 2.5, se han escogido los pares OD en los que los arcos que forman parte de sus distintas rutas intervienen directamente en, al menos, dos de las tres componentes seleccionadas mediante ACP y que guarden una alta relación, positiva o negativa, respecto de los nodos determinados como puntos calientes, en este caso, los nodos 73 y 75.

Nº	O-D	Rutas
1	75-73	{ 1, 3 }, {7,9,10,3}, {7,9,11,5,6}
2	75-63	{1, 3,4}, { 7,9,11 }, {7,9,10,3,4}
3	74-63	{ 3, 4 }, {2,7, 9, 11}
4	63-73	{ 5, 6 }
5	62-73	{10,3}, { 11, 5, 6 }
6	62-64	{ 11,5 }
7	61-73	{8, 1, 3}, {9, 10,3}, { 9,11, 5, 6 }
8	61-64	{ 9, 11, 5 }
9	61-63	{ 9, 11 }, {9, 10, 3, 4}, {8,1,3,4}

Tabla 2.6. Pares OD con sus rutas asociadas

Una vez realizado este cribado de pares OD, decidimos centrar el análisis en los 9 pares descritos en la Tabla 2.6 que incluye, además, las posibles rutas asociadas a los mismos. En negrita se han marcado las rutas más cortas entre origen y destino. Así, por ejemplo, el par OD número 1 tiene el nodo 75 como origen y el 73 como destino. Tiene tres rutas posibles, de las que la que pasa por los arcos 1 y 3 es la más corta. La Tabla 2.7 contiene la correspondiente matriz de enrutamiento (se marcan en negrita los tramos de las rutas más cortas).

Arcos	Rutas OD								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
Y ₁	1	1	0	0	0	0	1	0	1
Y ₂	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Y ₃	1	1	1	0	1	0	1	0	1
Y ₄	0	1	1	0	0	0	0	0	1
Y ₅	1	0	0	1	1	1	1	1	0
Y ₆	1	0	0	1	1	0	1	0	0
Y ₇	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Y ₈	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Y ₉	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Y ₁₀	1	1	0	0	1	0	1	0	1
Y ₁₁	1	1	1	0	1	1	1	1	1

Tabla 2.7. Matriz de enrutamiento

Así, por ejemplo, la ruta OD#1, cuyo flujo es X₁, puede realizarse por rutas que pasarían por los tramos 1, 3, 5, 6, 7, 9, 10 ú 11, pasando la ruta más corta por los tramos 1 y 3.

El modelo gráfico asociado al correspondiente modelo probabilístico, donde se marcan en negrita las flechas de los arcos en la ruta más corta, es

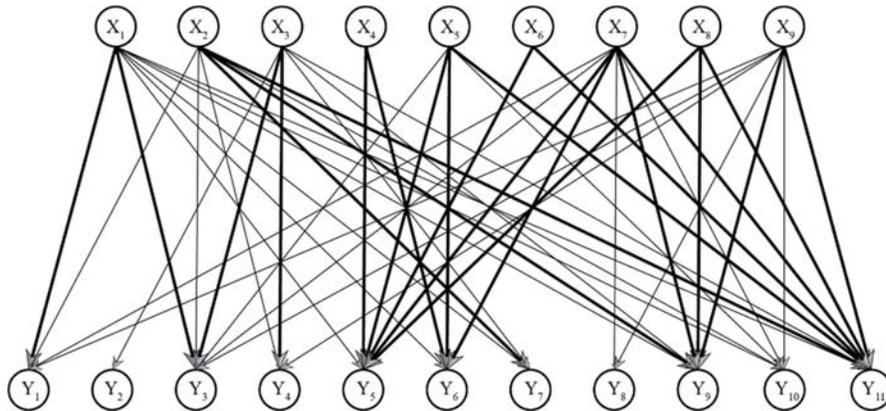


Figura 2.34. Modelo gráfico asociado de las rutas OD

El grafo de rutas y pares OD es

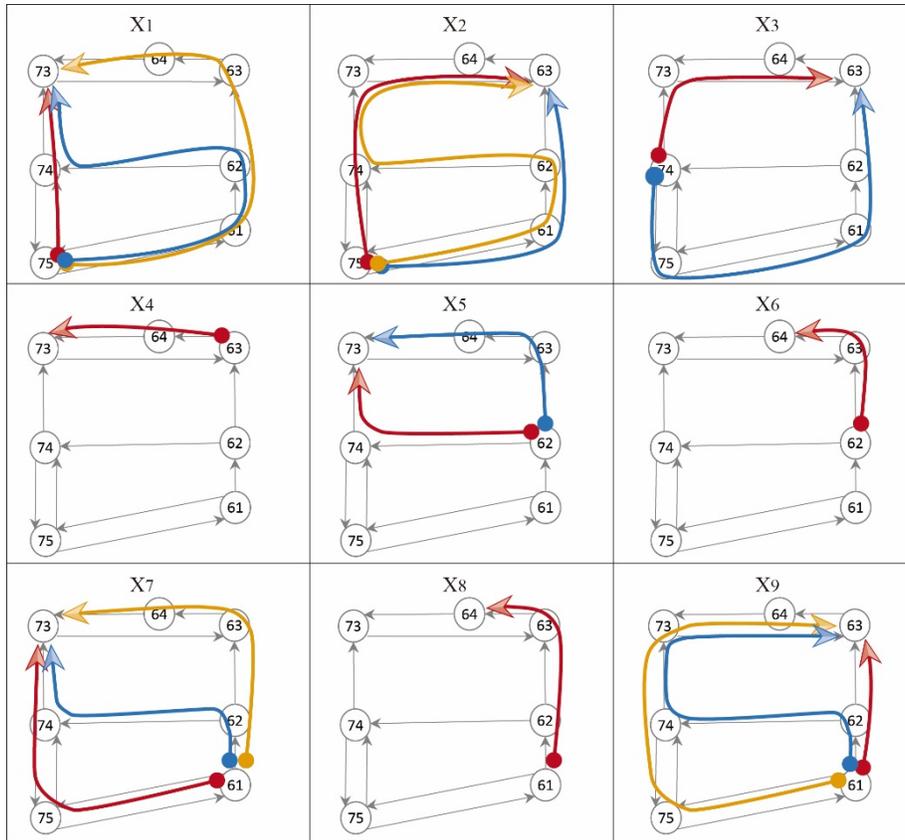


Figura 2.35. Grafo de rutas y pares OD

En cierto instante, por ejemplo, las 8:00, tenemos las siguientes predicciones de los arcos, provenientes de los MDL's de la sección 2.6, que usaremos para ilustrar nuestra propuesta

		8:00	
		Arcos	
		μ	σ
Y_1	75-74	228	17
Y_2	74-75	57	11
Y_3	74-73	140	12
Y_4	73-63	144	38
Y_5	63-64	137	24
Y_6	64-73	123	22
Y_7	75-61	223	16
Y_8	61-75	220	18
Y_9	61-62	217	33
Y_{10}	62-74	253	34
Y_{11}	62-63	29	3

Tabla 2.8. Predicciones de los flujos vehiculares en los arcos de la red ejemplo (horario: 8:00am)

El modelo se escribe

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_9) \sim N(\mu, \Sigma)$$

donde

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_9)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{19} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \sigma_{91} & \sigma_{92} & \dots & \sigma_9^2 \end{pmatrix}$$

y usaremos la notación $R = \Sigma^{-1}$. Además,

$$Y_1 \sim N(\beta_{11}x_1 + \beta_{12}x_2 + \beta_{17}x_7 + \beta_{19}x_9, \varphi_1^2)$$

$$Y_2 \sim N(\beta_{23}x_3, \varphi_2^2)$$

$$Y_3 \sim N\left(\sum_{j=1}^3 \beta_{3j}x_j + \beta_{35}x_5 + \beta_{37}x_7 + \beta_{39}x_9, \varphi_3^2\right)$$

$$Y_4 \sim N(\beta_{42}x_2 + \beta_{43}x_3 + \beta_{49}x_9, \varphi_4^2)$$

$$Y_5 \sim N\left(\beta_{51}x_1 + \sum_{j=4}^8 \beta_{5j}x_j, \varphi_5^2\right)$$

$$Y_6 \sim N(\beta_{61}x_1 + \beta_{64}x_4 + \beta_{65}x_5 + \beta_{67}x_7, \varphi_6^2)$$

$$Y_7 \sim N\left(\sum_{j=1}^3 \beta_{7j}x_j, \varphi_7^2\right)$$

$$Y_8 \sim N(\beta_{87}x_7 + \beta_{89}x_9, \varphi_8^2)$$

$$Y_9 \sim N\left(\sum_{j=1}^3 \beta_{9j}x_j + \sum_{j=7}^9 \beta_{9j}x_j, \varphi_9^2\right)$$

$$Y_{10} \sim N(\beta_{101}x_1 + \beta_{102}x_2 + \beta_{105}x_5 + \beta_{107}x_7 + \beta_{109}x_9, \varphi_{10}^2)$$

$$Y_{11} \sim N\left(\sum_{j=1}^3 \beta_{11j}x_j + \sum_{j=5}^9 \beta_{11j}x_j, \varphi_{11}^2\right)$$

Calculamos ahora las distribuciones a posteriori requeridas por el muestreador de Gibbs, que, habíamos anunciado, se corresponden a distribuciones normales. Tenemos² para la primera variable X_l , si r_{ij} designa al elemento ij de $R = \Sigma^{-1}$,

² En los términos relativos a $f(y_i|x)$, aparecen $\beta^l x^i$ que designa a los términos de $\sum \beta_{ij}x_j$ que no incluyen x_i

$$\begin{aligned}
& f(x_1|x_2, \dots, x_9, y) \propto f(x_1, x_2, \dots, x_9, y) \propto f(x_1, \dots, x_9) \prod_{i=1}^{11} f(y_i|x) \propto \\
& \propto f(x_1, \dots, x_9) f(y_1|x) f(y_3|x) f(y_5|x) f(y_6|x) f(y_7|x) f(y_9|x) f(y_{10}|x) f(y_{11}|x) \propto \\
& \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(x_1 - \mu_1)^2 r_{11}\right) \exp\left(\left(-\frac{1}{2}\right)\left(2x_1 \sum_{j \neq i} (x_j - \mu_j) r_{1j}\right)\right) \\
& \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_1 - (\beta_{11}x_1 + \beta^1 x^1))^2}{\varphi_1^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_3 - (\beta_{31}x_1 + \beta^3 x^3))^2}{\varphi_3^2}\right) \\
& \dots \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_{11} - (\beta_{111}x_1 + \beta^{11} x^{11}))^2}{\varphi_{11}^2}\right) \propto \\
& \propto \exp\left[-\frac{1}{2}\left(x_1^2 \left(r_{11} + \frac{\beta_{11}^2}{\varphi_1^2} + \frac{\beta_{31}^2}{\varphi_3^2} + \dots + \frac{\beta_{111}^2}{\varphi_{11}^2}\right) - 2x_1 \left(\mu_1 r_{11} + \frac{\beta_{11}}{\varphi_1^2} (\beta_{12}x_2 + \beta_{17}x_7 + \beta_{19}x_9 - y_1) + \right.\right. \\
& \left.\left. \frac{\beta_{31}}{\varphi_3^2} (\sum_{j=2}^3 \beta_{3j}x_j + \beta_{35}x_5 + \beta_{37}x_7 + \beta_{39}x_9 - y_3) + \frac{\beta_{51}}{\varphi_5^2} (\sum_{j=4}^8 \beta_{5j}x_j - y_5) + \frac{\beta_{61}}{\varphi_6^2} (\beta_{64}x_4 + \beta_{65}x_5 + \right.\right. \\
& \left.\left. \beta_{67}x_7 - y_6) + \frac{\beta_{71}}{\varphi_7^2} (\beta_{72}x_2 + \beta_{73}x_3 - y_7) + \frac{\beta_{91}}{\varphi_9^2} (\sum_{j=2}^3 \beta_{9j}x_j + \sum_{j=7}^9 \beta_{9j}x_j - y_9) + \frac{\beta_{101}}{\varphi_{10}^2} (\beta_{102}x_2 + \right.\right. \\
& \left.\left. \beta_{105}x_5 + \beta_{107}x_7 + \beta_{109}x_9 - y_{10}) + \frac{\beta_{111}}{\varphi_{11}^2} (\sum_{j=2}^3 \beta_{11j}x_j + \sum_{j=5}^9 \beta_{11j}x_j - y_{11}) - \sum_{j \neq i} (x_j - \mu_j) r_{1j}\right)\right],
\end{aligned}$$

que tiene la forma

$$\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_1^2}{\gamma_1^2} - 2\frac{\alpha_1}{\gamma_1^2}x_1\right)\right),$$

de donde se deducirían los α_1 y γ_1^2 pertinentes, correspondiendo a una distribución $N(\alpha_1, \gamma_1^2)$.

Por el mismo tipo de razonamiento, en general, si es

$$Y_j|x \sim N\left(\sum_{j \in \Pi_j} \beta_{ji}x_i, \varphi_j^2\right),$$

se tiene que

$$X_i|x_{-i}, y \sim N(\alpha_i, \gamma_i^2),$$

donde, si H_i designa a los nodos Y_j que son hijos de X_i ,

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\gamma_i^2} &= r_{ii} + \sum_{j \in H_i} \frac{\beta_{ji}^2}{\varphi_j^2} \\
\frac{\alpha_i}{\gamma_i^2} &= \left[-\sum_{j \neq i} (x_j - \mu_j) r_{ij} + \mu_i r_{ii} - \sum_{j \in H_i} \frac{\beta_{ji}}{\varphi_j^2} \left(\sum_{\substack{k \in H_i \\ k \neq j}} \beta_{jk} x_k - y_j \right) \right].
\end{aligned}$$

Resulta entonces el siguiente algoritmo de Gibbs, en nuestro ejemplo:

Calcular $R = \Sigma^{-1}$

Desde $i = 1$ hasta 9

{

$$\gamma_i^2 = \frac{1}{\left(r_{ii} + \sum_{j \in H_i} \frac{\beta_{ji}^2}{\varphi_j^2}\right)}$$

$$aux_i^1 = \gamma_i^2 \left[\mu_i r_{ii} + \sum_{j \in H_i} \frac{\beta_{ji}}{\varphi_j^2} y_j \right]$$

Desde $j = 1$ hasta 11

{

$$aux_{ji}^2 = \gamma_i^2 \frac{\beta_{ji}}{\varphi_j^2}$$

}

}

Inicializar $x_1^0, x_2^0, \dots, x_9^0, n = 0$

Hasta detectar convergencia

{

Desde $i = 1$ hasta 9

{

$$\alpha_i = aux_i^1 - \sum_{j \in H_i} aux_{ji}^2 \left(\sum_{\substack{k \in H_i \\ k \neq j}} \beta_{jk} x_k^n \right) - \gamma_i^2 \sum_{j \neq i} (x_j^n - \mu_j) r_{ij}$$

Generar $x_i^{n+1} \sim N(\alpha_i, \gamma_i^2)$

$$x_i^n = x_i^{n+1}$$

}

$$x^{n+1} = x^n$$

$$n = n + 1$$

}

}

Como hemos indicado, el modelo anterior podría extenderse para incluir distribuciones sobre los β_{ij}, φ_j^2 (e hiperdistribuciones sobre los μ y σ_{ij}). Para simplificar aquí supondremos conocidas las β_{ij}, φ_j^2 y describimos cómo obtener estimaciones de ellas.

Sea p_{ik} la proporción de usuarios del OD i que emplean la ruta k -ésima para ir del origen al destino correspondiente, y δ_{ak}^i un indicador que toma el valor 1, si el arco a pertenece a la ruta k del par OD i -ésimo, y 0, en caso contrario. Resulta entonces que

$$\beta_{ai} = \sum_k p_{ki} \delta_{ak}^i$$

Por ejemplo, se tendría para β_{11} : El par OD tiene rutas 1, 2, 3 con proporciones respectivas de usuarios p_{11}, p_{12}, p_{13} . Se tiene $\delta_{11}^1 = 1$ (la ruta es {1,3}), $\delta_{12}^1 =$

0 (la ruta es {7,9,10,3}), $\delta_{13}^1 = 0$ (la ruta es {7,9,11,5,6}), con lo que $\beta_{11} = p_{11}$, i.e, β_{11} es la proporción de usuarios del OD1 que pasan por la ruta 1.

Para β_{12} , el par OD2 tiene rutas 1, 2, 3 con proporciones respectivas p_{21}, p_{22}, p_{23} . Las incidencias son $\delta_{21}^1 = 0, \delta_{22}^1 = 1, \delta_{23}^1 = 0$, con lo que $\beta_{12} = p_{22}$.

Para β_{17} , el par OD7 tiene tres rutas con proporciones p_{71}, p_{72}, p_{73} . Las incidencias son $\delta_{71}^1 = 0, \delta_{72}^1 = 0, \delta_{73}^1 = 1$, con lo que $\beta_{17} = p_{73}$.

Para β_{19} , el par OD9 tiene tres rutas con proporciones p_{91}, p_{92}, p_{93} con incidencias $\delta_{91}^1 = 0, \delta_{92}^1 = 0, \delta_{93}^1 = 1$, con lo que $\beta_{19} = p_{93}$.

Para β_{23} , el par OD3 tiene dos rutas con proporciones p_{31}, p_{32} con incidencias $\delta_{21}^1 = 0, \delta_{22}^1 = 1$, con lo que $\beta_{23} = p_{32}$.

En conjunto, repitiendo el proceso, queda la matriz β

$$\beta = \begin{array}{c|cccccccccc} & \mathbf{1} & \mathbf{2} & \mathbf{3} & \mathbf{4} & \mathbf{5} & \mathbf{6} & \mathbf{7} & \mathbf{8} & \mathbf{9} \\ \hline \mathbf{1} & p_{11} & p_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{71} & 0 & p_{93} \\ \mathbf{2} & 0 & 0 & p_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{3} & p_{11} & p_{21} & p_{31} & 0 & p_{51} & 0 & p_{71} & 0 & p_{92} \\ \mathbf{4} & 0 & p_{21} & p_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{92} \\ \mathbf{5} & p_{13} & 0 & 0 & p_{41} & p_{52} & p_{61} & p_{73} & p_{81} & 0 \\ \mathbf{6} & p_{13} & 0 & 0 & p_{41} & p_{52} & 0 & p_{73} & 0 & 0 \\ \mathbf{7} & p_{12} & p_{22} & p_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{71} & 0 & p_{93} \\ \mathbf{9} & p_{12} & p_{22} & p_{32} & 0 & 0 & 0 & p_{73} & p_{81} & p_{91} \\ \mathbf{10} & p_{12} & p_{23} & 0 & 0 & p_{51} & 0 & p_{72} & 0 & p_{92} \\ \mathbf{11} & p_{13} & p_{22} & p_{32} & 0 & p_{52} & p_{61} & p_{73} & p_{81} & p_{91} \end{array}$$

Tabla 2.9. Matriz β en nuestro problema

Se trata pues de aportar métodos para asignar los p_{ik} . Castillo et al (2008), (2011) sugieren métodos SUE. Nosotros emplearemos un método similar al de estimación de proporciones en las bifurcaciones, como en la Sección 2.2. Para ello, ante el OD_i y sus k rutas, podemos preguntar a n_i personas cuál de las rutas emplearían. Si n_{ij} responden que la ruta j -ésima, utilizamos la estimación

$$\widehat{p}_{ij} = \frac{n_{ij} + 1}{n + k}, \quad j = 1, \dots, k,$$

donde suponemos una distribución a priori no informativa. Podemos, en cualquier caso, acomodar fácilmente otra información a priori.

A partir de estas estimaciones construimos la matriz β , sustituyendo los \widehat{p}_{ij} . En nuestro caso, obtenemos que la tabla de p 's es, suponiendo una distribución uniforme a priori y que no hemos preguntado a usuarios,

OD	Ruta		
	1	2	3
1	1/3	1/3	1/3
2	1/3	1/3	1/3
3	1/2	1/2	0
4	1	0	0
5	1/2	1/2	0
6	1	0	0
7	1/3	1/3	1/3
8	1	0	0
9	1/3	1/3	1/3

Tabla 2.10. Tabla de proporciones de usuarios

con lo que la matriz β quedaría

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1/3	1/3	0	0	0	0	1/3	0	1/3
2	0	0	1/2	0	0	0	0	0	0
3	1/3	1/3	1/2	0	1/2	0	1/3	0	1/3
4	0	1/3	1/2	0	0	0	0	0	1/3
5	1/3	0	0	1	1/2	1	1/3	1	0
6	1/3	0	0	1	1/2	0	1/3	0	0
7	1/3	1/3	1/2	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1/3	0	1/3
9	1/3	1/3	1/2	0	0	0	1/3	1	1/3
10	1/3	1/3	0	0	1/2	0	1/3	0	1/3
11	1/3	1/3	1/2	0	4	4	1/3	3	1/3

Tabla 2.11. Matriz β

Respecto de las φ_j^2 , que se corresponden a las varianzas de $Y_j|x$, parece razonable estimarlas como la varianza correspondiente al modelo dinámico lineal que predice Y_j .

Para acabar, sólo nos falta construir la distribución a priori

$$X \sim N(\mu, \Sigma),$$

para lo que seguimos esta aproximación. Suponemos que, a priori, las σ_{ij} para $i \neq j$ son 0, con lo que para cada $i=1, \dots, 9$, debemos estimar μ_i y σ_i^2 . Para ello, pedimos a un experto el flujo máximo M_i de tráfico que él espera en la ruta i -ésima y el flujo modal m_i . Entonces, hacemos

$$\mu_i = m_i$$

$$\sigma_i = \frac{M_i - m_i}{2}.$$

Suponemos, implícitamente, que $[m_i - 2\sigma_i, M_i]$ es un intervalo de probabilidad 0.95. Alternativamente, podríamos reconstruir los flujos OD a partir de los datos en los arcos a distintas horas y hacer una estimación. En nuestro ejemplo, las distribuciones a priori empleadas serán

	μ_i	σ_i
X ₁	303	35
X ₂	296	40
X ₃	245	25
X ₄	58	10
X ₅	137	29
X ₆	33	13
X ₇	339	43
X ₈	69	13
X ₉	336	41

Tabla 2.12. Predicciones de flujos vehiculares en las rutas OD

Obsérvese, en cualquier caso, que esto se correspondería a una primera iteración del método. En iteraciones posteriores, podría utilizarse como a priori la a posteriori resultante del instante anterior, mejorándose las estimaciones. A un paso, la distribución a priori sería $p(X|y)$. Aprovechemos estas observaciones más tarde en el Capítulo 4.

Tenemos ya todos los elementos necesarios para implantar el modelo, que se ha hecho en R. A partir del código generado, se dejó ejecutar el algoritmo 10000 iteraciones hasta convergencia y se recogieron los siguientes 5000 valores. Supuesto que las observaciones

fueron las medias recogidas en la Tabla 2.8, las probabilidades respectivas de saturación de flujo resultantes se muestran en la Tabla 2.13.

OD	Prob. Saturación
X ₁	0,969
X ₂	0,999
X ₃	0,300
X ₄	1,97E-14
X ₅	0,738
X ₆	0,046
X ₇	0,995
X ₈	0,116
X ₉	0,985

Tabla 2.13. Probabilidades de saturación en las rutas OD

Como se aprecia tenemos claros problemas de saturación en las rutas 1, 2, 5, 7 y 9 que es donde deberíamos centrar nuestros esfuerzos de mejora del tráfico, por ejemplo con ayuda de los métodos que presentamos en el Capítulo 4.

Claramente, el resultado se simplifica si sólo comunicamos las rutas OD por los caminos más cortos. En nuestro caso, preferimos mantener todas las rutas, siempre que sea computacionalmente factible.

2.8. Conclusiones

En este capítulo hemos introducido diversos métodos para el análisis de tráfico en una zona urbana:

- Métodos de imputación, basados en el modelo beta binomial y ecuaciones de equilibrio de flujo, en caso de que sea necesario disponer de datos en todos los arcos de una red vial.
- Análisis de correlaciones para depuración y corrección de datos.
- Métodos de análisis de componentes principales para identificar zonas más conflictivas de tráfico. Por ejemplo, ayudan a detectar puntos calientes en una red

vial, determinando así dónde poner mayor atención en la planificación. Otra utilidad sería detectar lugares en donde se podrían colocar dispositivos de conteo de vehículos, personas, etc., con el fin de obtener un buen histórico de datos. Este histórico ayudaría sustancialmente en la parte estadística para ajustar mejor la tendencia y su posterior aplicación en los MDLs utilizados. Por último, pero no menos importante, ayuda a encontrar los principales pares OD.

- Modelos dinámicos lineales polinómicos de orden 2, para predicción a corto plazo de la saturación en puntos de la red. Los MDLs para predicción expuestos ayudan a predecir los flujos vehiculares en cada arco para los siguientes períodos de tiempo, facilitando la determinación de las probabilidades de saturación en esos puntos. Al detectar una probabilidad alta de saturación futura, se pueden disparar alarmas para establecer posibles soluciones de descongestión de tráfico. Por ejemplo, incrementar el número de carriles, variar el tiempo de transición en los semáforos existentes, cambiar las direcciones de los arcos o reforzar líneas de autobuses públicos.
- Predicción, a corto plazo, de flujos OD dinámicos, lo que, de nuevo, permite identificar intervenciones. Podemos hacer predicciones de los flujos en todos los pares OD y, en consecuencia, la saturación en el correspondiente OD y sus rutas asociadas. Las ideas serían similares a las anteriores, pero ahora con una perspectiva global de una zona de la ciudad, en lugar de centrarnos en puntos específicos, como hicimos antes.

En el siguiente capítulo, aplicaremos los métodos introducidos a un área y red de tamaño real para identificar los problemas de circulación en la ciudad, estudiando la escalabilidad de los métodos propuestos y las adaptaciones computacionales y de modelización que debemos hacer en aplicaciones reales.

CAPITULO 3

APLICACIÓN A LA RED DE ESTUDIO

3.1. Introducción

En este capítulo realizamos el análisis a la red de estudio ampliada, aplicando los métodos básicos presentados en el Capítulo 2. Nuestro objetivo es estudiar la escalabilidad de los métodos propuestos, verificando cómo se pueden aplicar en problemas de tamaño realista.

Así, en primer lugar, determinamos los flujos vehiculares en los arcos donde no existe información, para lo que se han aplicado métodos de imputación basados en los datos existentes, con la ayuda del modelo beta-binomial antes presentado. Luego, con el fin de facilitar la aplicación de análisis de componentes principales, la red de estudio se ha subdividido en 5 partes, para determinar los puntos de influencia o puntos calientes dentro de la red. A continuación, se aplican los modelos dinámicos lineales a la red de estudio, para predecir los flujos en los siguientes períodos de tiempo y la probabilidad de saturación que pueda existir en cada uno de los arcos donde hay mediciones. De esta forma, se identifican los lugares donde se debe actuar para mejorar el tráfico. Finalmente, se aplica nuestro método para determinar predicciones de flujos OD dinámicos, que permitirán identificar localizaciones en las que se deben realizar intervenciones con el fin de mejorar el flujo vehicular y evitar posibles saturaciones.

3.2. Imputación de valores de flujo faltantes en arcos

En la Figura 3.1 se muestra la red de estudio con arcos marcados de color rojo y color negro. Los arcos en rojo son aquellos para los que poseemos datos proporcionados por la DTM. Con el fin de determinar datos para los arcos restantes que carecían de información dentro de la red de estudio, se han realizado diferentes operaciones a partir de la

información disponible que nos ayuden a imputar los valores para todos los arcos donde sea posible hacerlo, en caso de que los necesitemos por razones estadísticas y de gestión.

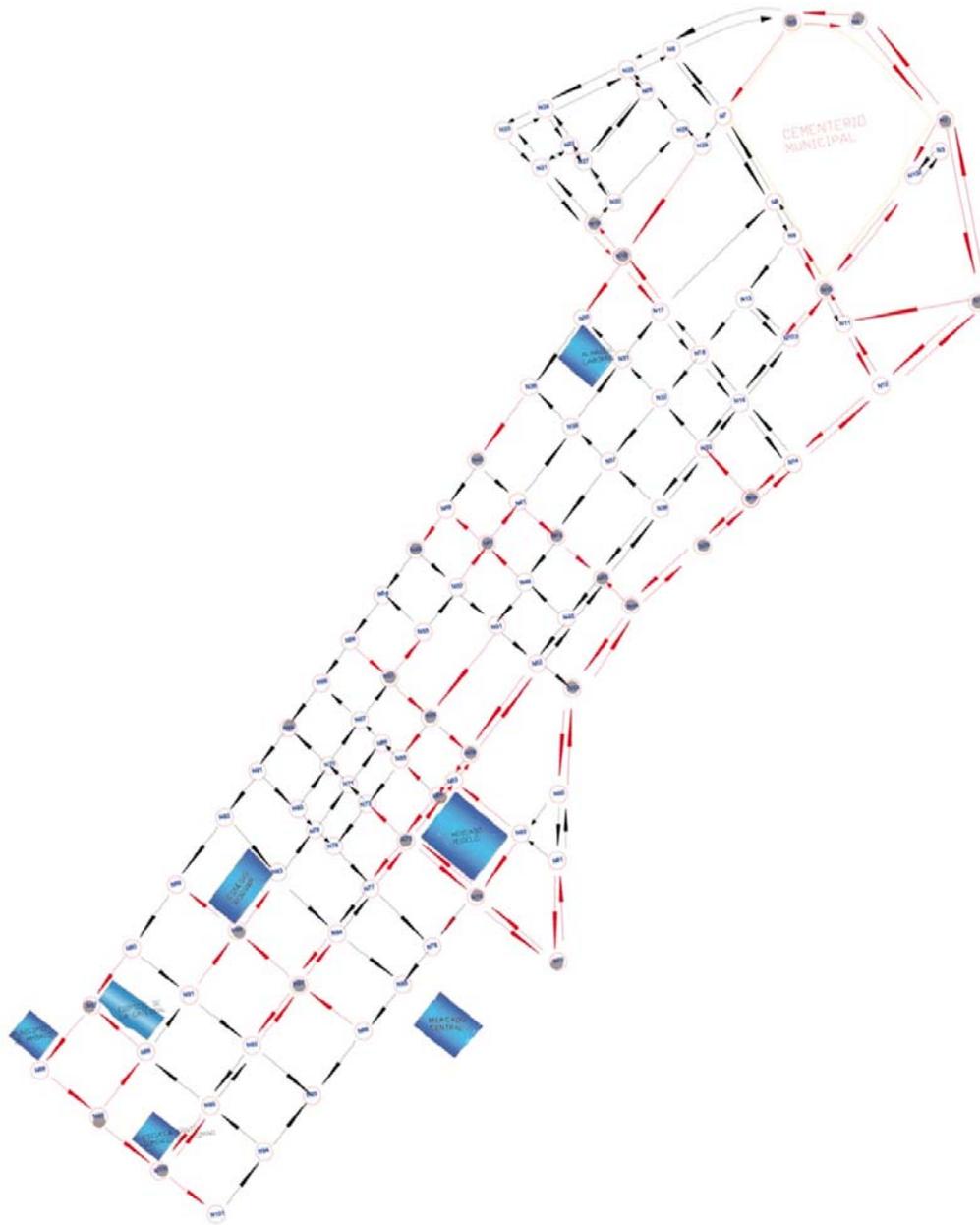


Figura 3.1. Red de arcos con datos disponibles

La imputación de valores se ha realizado según el modelo beta-binomial, junto con ecuaciones de flujo, expuesto en la Sección 2.3 del Capítulo 2. Al igual que en la red

ejemplo de ese capítulo, se aplicaron las correcciones necesarias según las recomendaciones de la sección mencionada, en caso de existir información errónea.

Como ejemplo, en el caso que se muestra en la Figura 3.2, para los arcos en color rojo (a, d, f, g, h, j) disponemos de datos, mientras que los de color negro (c, e, i) son los que se necesita calcular según las fórmulas presentadas en la Tabla 3.1:

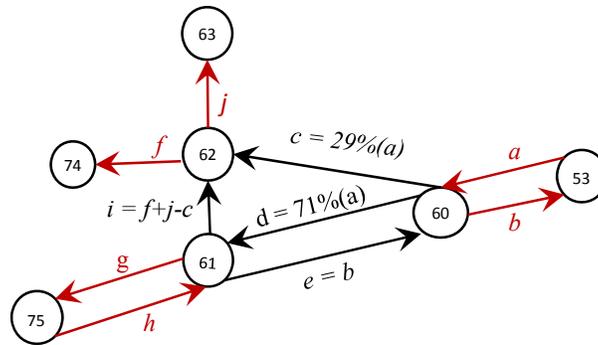


Figura 3.2. Arcos sin datos para calcular a partir de otros arcos

Arcos		Fórmula asignada
61	60	$e = b$
60	61	$d = 0.71(a)$
60	62	$c = 0.29(a)$
61	62	$i = f + j - c$

Tabla 3.1. Fórmulas asignadas para calcular los valores de los arcos restantes

En la Tabla 3.1, se puede observar que al arco e se le asignan los valores del arco b debido a que entre estos dos arcos no existe ninguna vía adicional de entrada o salida. En el caso del arco d , se ha determinado que se corresponde un 71% del arco a , ya que al restar entre los datos existentes de g menos a se obtienen la cantidad de autos que se desviaron por los arcos c e i con un promedio aproximado del 30% de a . Además, se tiene conocimiento de que son muy pocos autos del arco d los que giran por el arco i , por lo que se le ha asignado un 1% indicado arriba. Por ello, suponemos que el 29% del arco a se desvía por el arco c . Finalmente, teniendo los valores de entradas y salidas en el nodo 62, sólo hace falta sumar las salidas de este nodo, en este caso los arcos f y j , y restar la entrada conocida para determinar los valores del arco faltante i . Todo esto queda reflejado en la Tabla 3.2,

en la que se pueden visualizar los flujos vehiculares de las tres bandas horarias, con los cálculos indicados para cada arco.

Horario	$e = b$	a	g	resta	$a - g$	arco d	arco c	j	f	arco i
				$a - g$	expresado en % de a	$=71\%(a)$	$=29\%(a)$			$= f + j - c$
6:45	204	320	202	118	37%	227	93	23	216	147
7:00	203	366	228	138	38%	260	106	21	244	159
7:15	203	356	235	121	34%	252	103	29	262	188
7:30	172	296	201	95	32%	210	86	37	278	229
7:45	164	288	219	69	24%	204	84	24	248	188
8:00	196	306	209	97	32%	218	89	34	268	214
8:15	186	292	197	95	33%	207	85	39	213	167
8:30	182	318	208	110	35%	226	92	66	222	196
8:45	170	334	214	120	36%	237	97	44	265	212
12:00	159	232	203	29	13%	164	67	80	290	303
12:15	160	282	200	82	29%	200	82	52	248	218
12:30	152	280	198	82	29%	199	81	61	243	223
12:45	142	250	199	51	20%	178	73	41	240	208
13:00	146	283	214	69	24%	201	82	54	238	209
13:15	160	266	230	36	14%	189	77	48	238	208
13:30	138	244	190	54	22%	174	71	38	238	205
13:45	152	284	206	78	27%	202	83	43	198	158
16:00	185	336	200	136	40%	239	97	51	280	234
16:15	182	285	218	67	24%	202	83	57	313	287
16:30	143	253	197	56	22%	180	73	66	220	214
16:45	144	324	201	123	38%	230	94	95	228	229
17:00	159	334	193	141	42%	237	97	57	196	156
17:15	164	304	194	110	36%	216	88	49	218	179
17:30	163	317	194	123	39%	225	92	50	210	168
17:45	174	317	175	142	45%	225	92	42	232	183
18:00	162	298	218	80	27%	211	86	57	194	164
18:15	162	272	195	77	28%	193	79	54	212	187
18:30	140	274	183	91	33%	194	79	52	154	127
18:45	134	268	206	62	23%	191	78	57	184	164
% promedio de desvío por los arcos c e i					30%					

Tabla 3.2. Determinación de porcentajes y datos de arcos faltantes

Podemos observar en la Figura 3.3, la matriz de relaciones entre los arcos de la Figura 3.2, poniendo énfasis principal en los arcos calculados respecto de los arcos con datos

que se han utilizado para obtener sus valores. Es el caso de la relación entre los arcos (60-61), (53-60) y el arco (60-62); los arcos (61-62), (62-63) y (62,74); y, desde luego, los arcos (53-60), (60-61) y (61,75) que han ayudado directamente a obtener los valores.

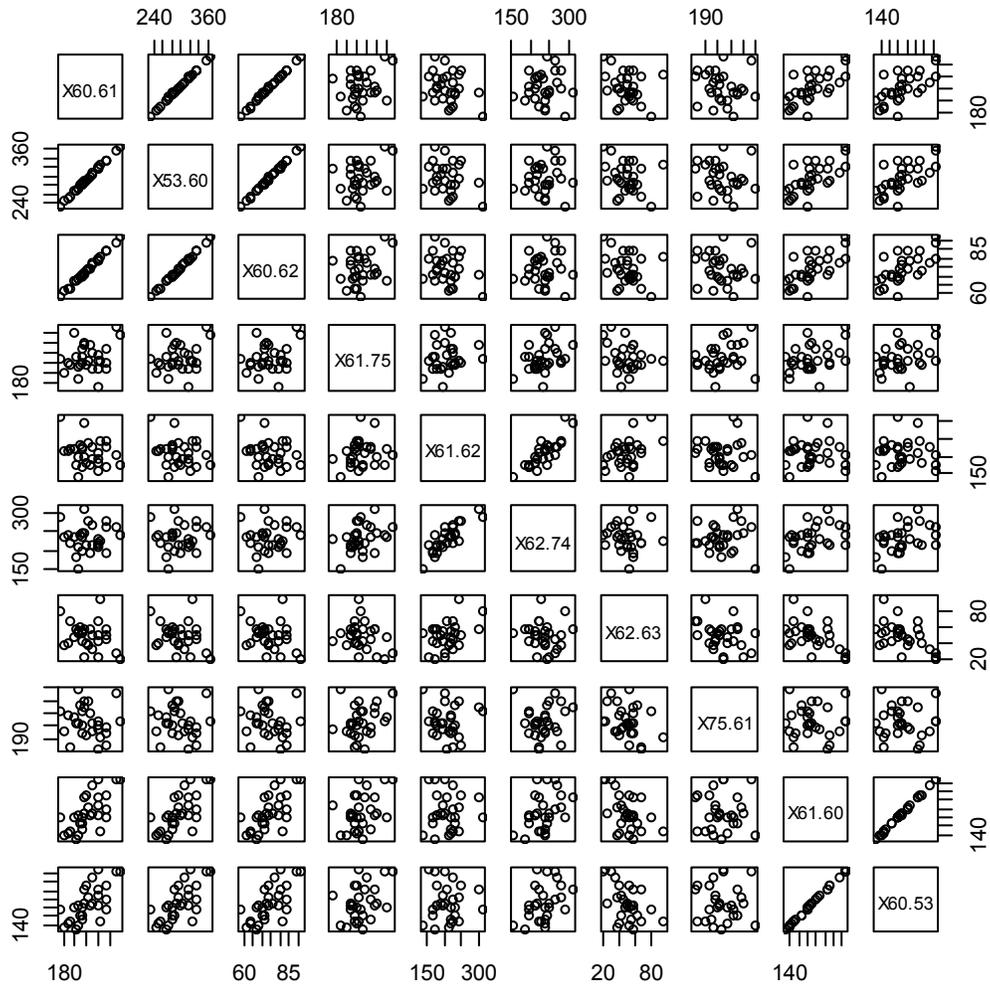


Figura 3.3. Relación entre los arcos con datos y arcos calculados

Tomando consideraciones similares, se han logrado calcular la mayor parte de valores para los arcos de la red de estudio, según se indica en la Figura 3.4 marcados en rojo, incluidos los arcos con datos disponibles inicialmente.

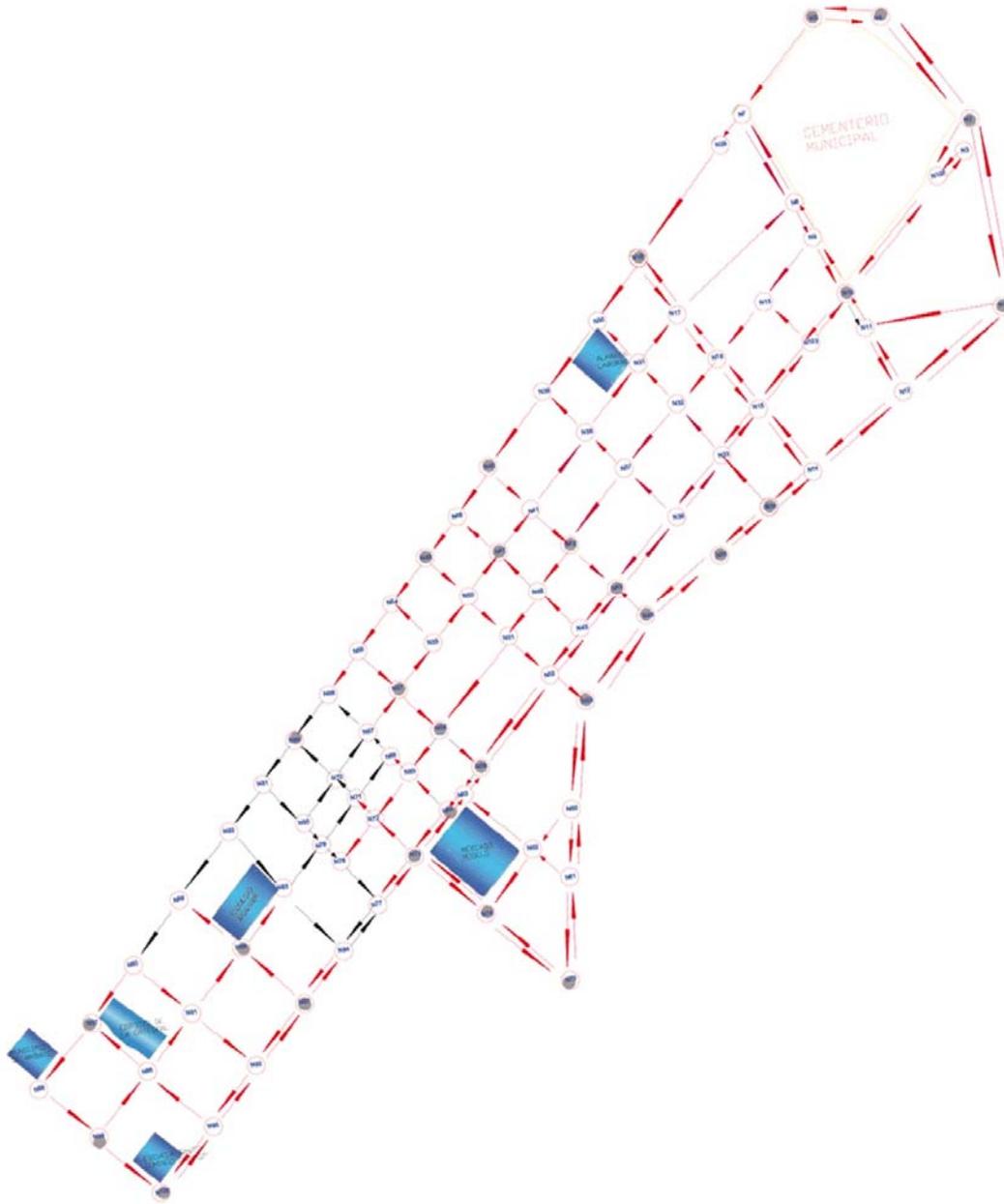


Figura 3.4. Red de arcos con datos disponibles y calculados

3.3. Análisis de Componentes Principales en la Red

Con el fin de aplicar componentes principales para un análisis más minucioso e informativo, se ha decidido subdividir la red de estudio en 5 secciones. Estas se han construido tomando en cuenta para la división las principales avenidas de la zona y la ubicación de los nodos aforo. Como se puede observar en la Figura 3.5: la red 1 queda

comprendida entre los nodos 100, 59, 56 y 98; la red 2, entre los nodos 56, 59, 63, 61, 44 y 40; la red 3, entre los nodos 40, 44, 14 y 18; la red 4, entre los nodos 18,14, 1, 2, 4 y 5; y, finalmente, la red ejemplo que se analizó en el Capítulo 2. En las Tablas 3, 5, 6 y 7 del Anexo 2, se pueden observar los datos de los arcos de las subredes 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

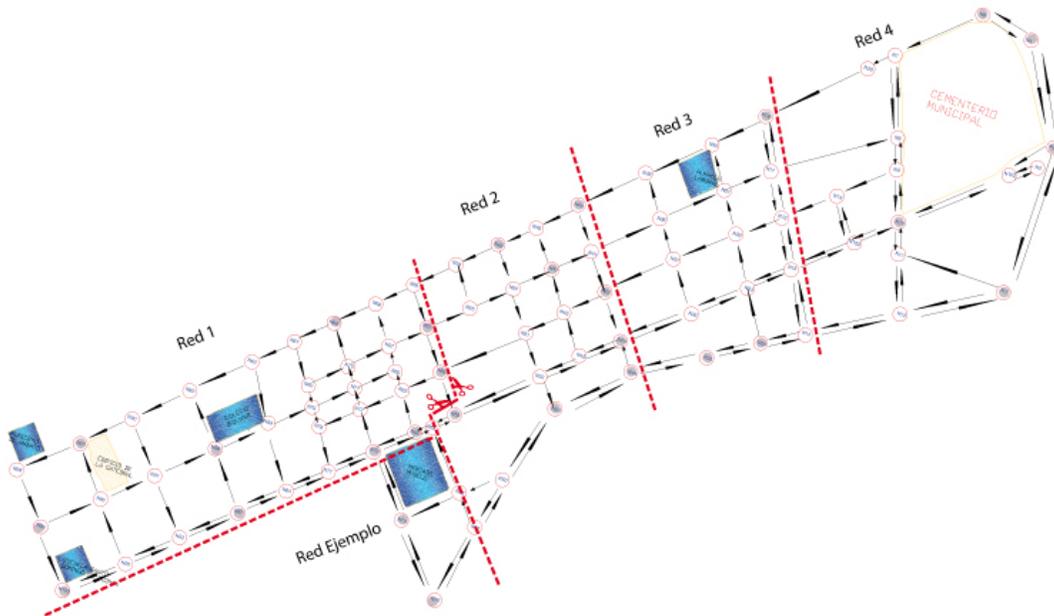


Figura 3.5. Red de arcos con datos disponibles y calculados

3.3.1. Componentes principales en la Red 1

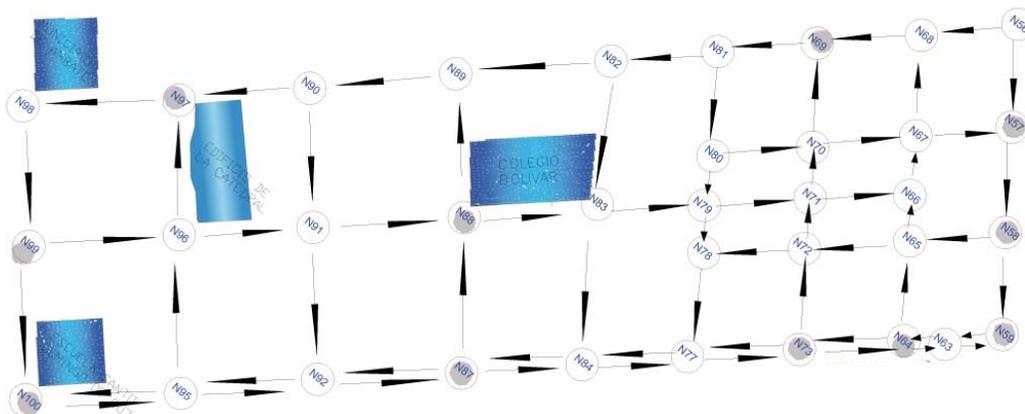


Figura 3.6. Gráfico de la sección Red 1

La Figura 3.6 muestra la sección de la red 1, mientras que la Figura 3.7 contiene los resultados de las componentes principales aplicadas en las tres bandas horarias.

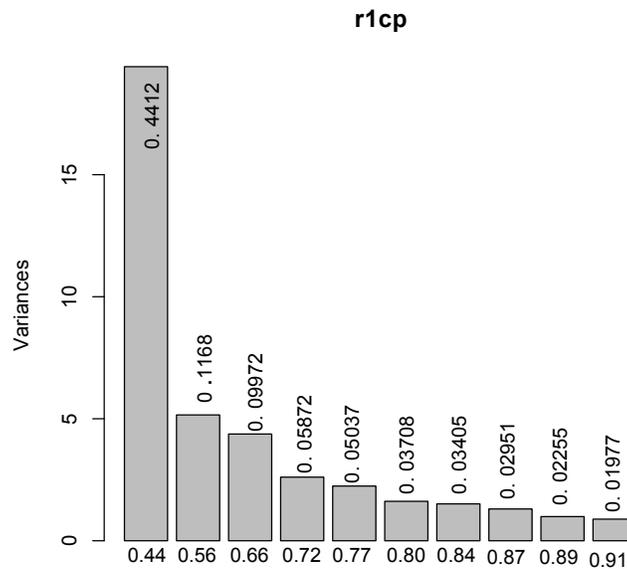


Figura 3.7. Varianzas explicadas por componentes principales (red1)

Después de aplicar ACP a la matriz de datos de la red 1, se obtiene el gráfico con los valores de la varianza explicada a cada una de las componentes principales, que en este caso fueron 29. Para esta sección de la red parece razonable quedarse con las tres primeras componentes principales ya que, con ellas, se explica un 66% de la varianza, siendo la matriz de cargas la que se muestra en la Tabla 3.3, en la que cada casilla contiene una barra de color rojo para valores negativos o azul para positivos. La extensión de la barra dependerá del valor que contenga el casillero con el fin de facilitar su visualización e interpretación.

Arco	PC1	PC2	PC3
X56.68	-0,05	0,06	-0,04
X82.89	-0,14	0,06	-0,27
X89.90	-0,16	0,06	-0,22
X90.97	-0,14	0,14	-0,19
X97.98	-0,15	0,18	-0,18
X99.96	-0,05	0,35	-0,08
X96.91	-0,09	0,37	-0,08
X91.88	-0,11	0,02	-0,05
X88.83	-0,16	0,05	0,31
X67.57	-0,15	-0,17	-0,07
X58.65	-0,19	-0,11	-0,09
X65.72	-0,19	-0,11	-0,10
X72.78	-0,19	-0,13	-0,08
X59.63	-0,18	-0,17	-0,12
X63.59	-0,19	0,04	0,10
X63.64	-0,18	-0,16	-0,11
X64.63	-0,17	0,07	0,18
X64.73	-0,17	-0,17	-0,10
X73.64	-0,17	0,07	0,18
X73.77	-0,17	-0,18	-0,10
X77.73	-0,17	0,08	0,15
X84.87	-0,21	-0,07	-0,05
X87.84	-0,16	0,05	0,31
X87.92	-0,22	-0,06	-0,03
X92.87	-0,16	0,04	0,26
X92.95	-0,22	0,01	-0,04
X95.92	-0,15	0,02	0,27
X95.100	-0,17	-0,02	0,13
X100.95	-0,02	0,15	0,13
X98.99	-0,09	0,12	-0,11
X99.100	-0,13	-0,02	0,23
X95.96	-0,08	0,10	0,06
X96.97	-0,11	0,22	-0,03
X90.91	-0,11	0,35	-0,08
X91.92	-0,09	0,37	-0,08
X87.88	-0,16	0,02	0,09
X88.89	-0,13	0,04	0,29
X73.72	-0,05	-0,19	0,12
X72.71	-0,07	-0,21	0,11
X64.65	-0,19	-0,06	-0,12
X65.66	-0,20	-0,08	-0,11
X56.57	-0,06	0,04	0,06
X57.58	-0,18	-0,08	-0,06
X58.59	-0,17	-0,06	-0,14

Tabla 3.3. Matriz de resultados de la componentes elegidas(red1)

En la Figura 3.8 a), b) y c) se muestran las componentes PC1, PC2 y PC3 respectivamente, en donde se visualizan los arcos con cargas negativas en color rojo, positivas en azul y gris las de valor próximo a 0, tan sólo para visualizar la estructura de la red y facilitar su interpretación.

La componente PC1 tiene coeficientes negativos para todas las variables, no siendo ninguna de ellas de valor especialmente alto y explicando el 44% de la variación. Por

(82-89), (89-90), (90-97), (97-98), (58-59). En la Figura 3.8.c se observa claramente dos de las principales vías más utilizadas (Av. Cevallos y Calle Bolivar) para el ingreso y salida de la red, marcadas casi todo su trayecto en color azul o rojo.

3.3.2. Componentes principales en la Red 2

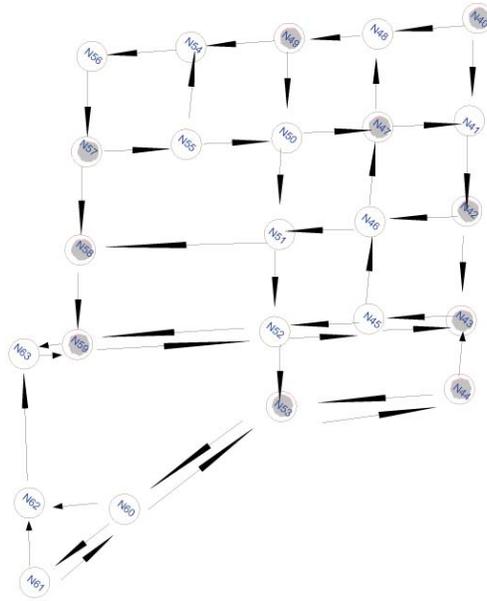


Figura 3.9. Esquema de la sección Red 2

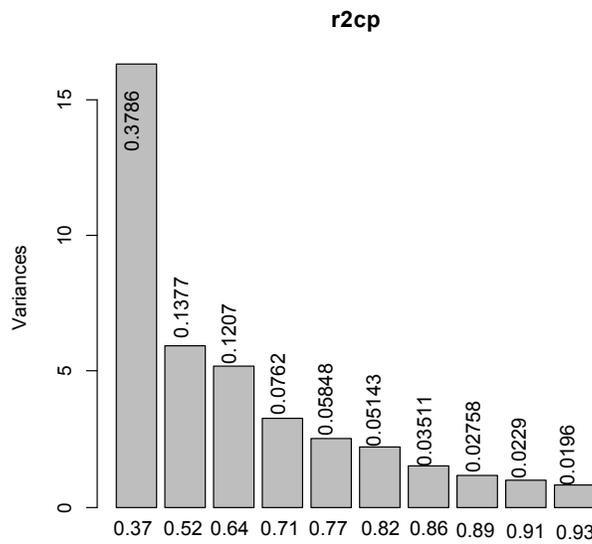


Figura 3.10. Gráfico de barras de las varianzas explicadas por componentes principales(red2)

La Figura 3.9 muestra la sección 2 con sus arcos y nodos. La Figura 3.10 contiene los resultados de las componentes principales aplicadas a esta sección de la red 2. De nuevo,

para esta sección parece razonable quedarse con las tres primeras componentes principales, ya que con ellas se explica el 64% de la varianza. El resto aporta menos del 10% cada una, siendo la matriz de cargas la que se muestra en la Tabla 3.4, con el mismo formato indicado anteriormente.

Arco	PC1	PC2	PC3
X56.57	-0,09	0,10	0,11
X57.58	-0,22	-0,01	-0,01
X58.59	-0,22	-0,06	0,06
X61.62	-0,06	-0,02	-0,20
X62.63	-0,19	0,02	-0,13
X55.54	-0,22	-0,01	0,03
X49.50	-0,13	0,02	-0,10
X50.51	-0,16	0,02	-0,07
X51.52	-0,22	0,01	0,02
X52.53	-0,03	0,19	0,09
X45.46	-0,19	0,11	-0,16
X46.47	-0,16	-0,02	0,22
X47.48	-0,17	0,02	0,24
X40.41	-0,18	-0,14	0,18
X41.42	-0,18	-0,13	0,19
X42.43	-0,08	-0,16	0,25
X44.43	-0,12	-0,01	0,23
X44.53	0,11	0,22	0,20
X53.44	-0,13	0,01	0,07
X53.60	0,08	0,29	0,23
X60.53	0,15	0,17	0,11
X60.62	0,08	0,28	0,23
X60.61	0,08	0,28	0,23
X61.60	0,15	0,17	0,11
X43.45	-0,10	0,18	-0,13
X45.43	-0,20	0,08	-0,07
X45.52	-0,10	0,19	-0,13
X52.45	-0,21	0,08	-0,06
X52.59	-0,12	0,11	-0,19
X59.52	-0,20	0,08	-0,06
X59.63	-0,18	0,05	-0,18
X63.59	-0,18	0,09	-0,08
X42.46	-0,16	-0,02	0,06
X46.51	-0,02	0,01	-0,14
X51.58	-0,20	-0,01	0,09
X57.55	-0,23	0,00	0,03
X55.50	-0,23	-0,01	0,03
X50.47	-0,15	0,12	0,27
X47.41	-0,15	0,10	0,26
X40.48	-0,01	0,31	-0,13
X48.49	-0,02	0,31	-0,12
X49.54	-0,04	0,31	-0,11
X54.56	-0,04	0,31	-0,12

Tabla 3.4. Matriz de resultados de la componentes elegidas(red2)

La componente PC1 guarda relación negativa baja con casi todos los arcos, siendo los más relevantes los arcos (57-58), (58-59), (55-54), (51-52), (52-45), (57-55) y (55,50), lo

que indicaría que por estas vías existe mayor afluencia de vehículos como salida de esta sección de red. Guarda relación positiva relevante con los arcos (60-53) y (61-60), aunque sus cargas son bajas. Esto sugiere que en el lugar existe una afluencia vehicular similar en todos los arcos, muy comprensible ya que en este sector circulan autobuses urbanos permanentemente por la mayoría de los arcos.

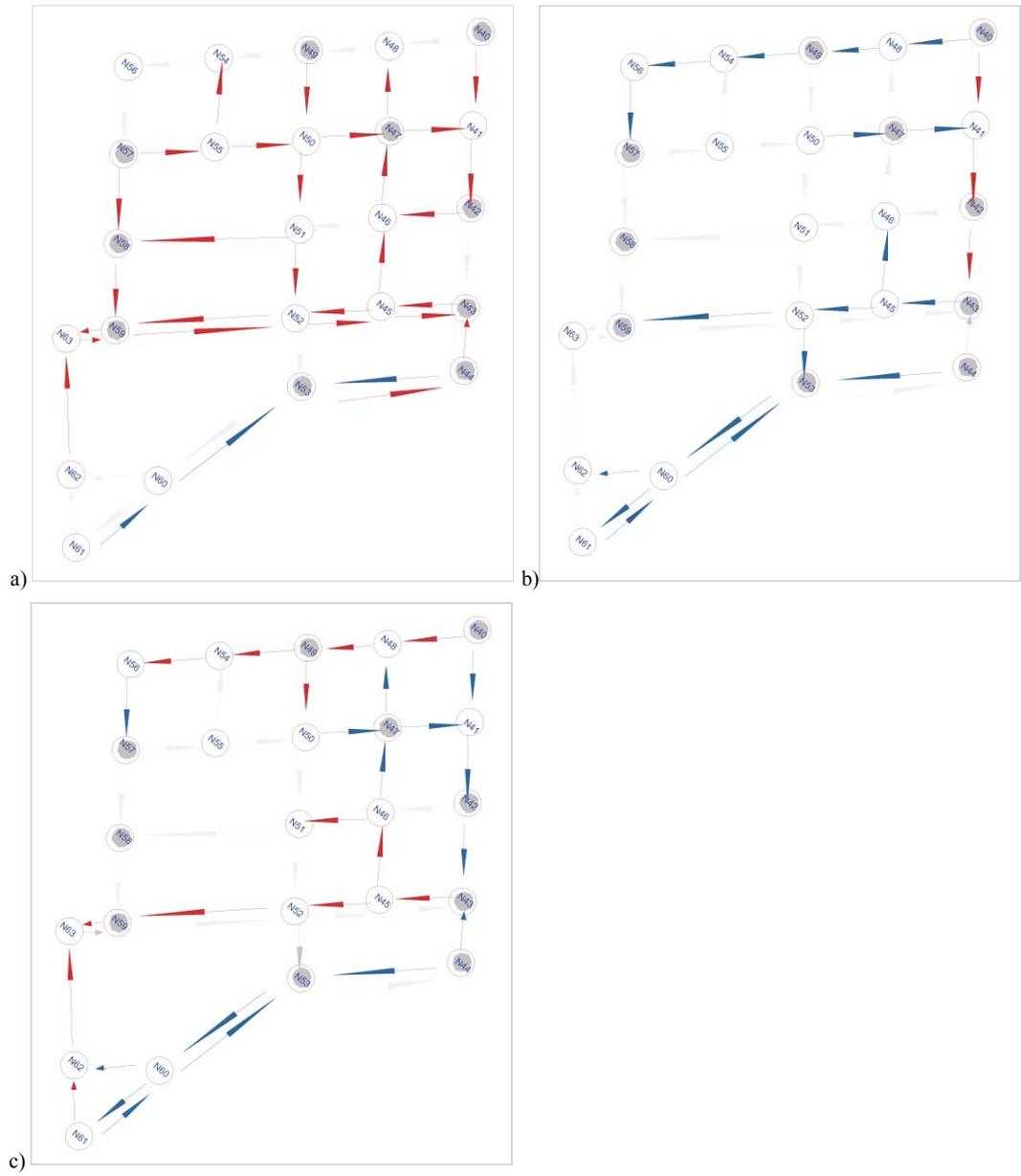


Figura 3.11. Gráfica de las Componentes Principales 1,2 y 3 (Red 2)

La segunda componente principal guarda relación positiva relevante con los arcos (44-53), (53-60), (60-62), (60-61), (40-48), (48-49), (49-54) y (54-56), sugiriendo que existe mayor afluencia de tráfico por los arcos de la calle Bolívar, Av. Cevallos y Av. 12 de Noviembre. Esto es razonable para este sector, ya que, como habíamos mencionado, circulan autobuses de forma frecuente, en especial por los arcos de la Av. 12 de Noviembre donde se encuentra una de las principales paradas de autobuses urbanos. Los arcos con los que guarda relación negativa más relevante son (40-41), (41-42) y (42-43). Finalmente, la componente PC3 guarda relación positiva relevante con los arcos (47-48), (42-43), (44-43), (53-60), (60-62), (60-61), (50-47) y (47-41), y relación negativa relevante con los arcos (61-62), (45-46), (52-59), (59-63) y (46-51). En la Figura 3.11 a), b) y c) se muestran las componentes PC1, PC2 y PC3 respectivamente.

3.3.3. Componentes principales en la sección Red 3

En la Figura 3.12 se muestra la sección red3, mientras que en la Figura 3.13 se muestran los resultados después de aplicar las componentes principales a los datos de la Tabla 6 del Anexo 1.

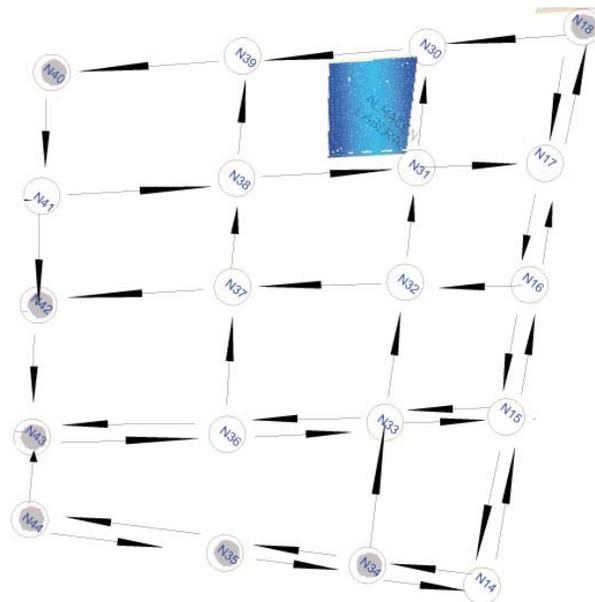


Figura 3.12. Esquema de la sección Red 3

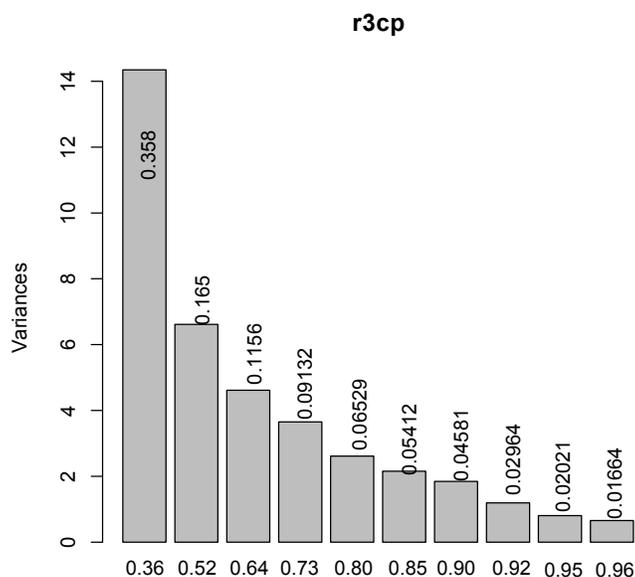


Figura 3.13. Gráfico de barras de las varianzas explicadas por componentes principales(red3)

En el caso de la red 3, se escogen de nuevo las tres primeras componentes que explican un 64% de la variación. La matriz de cargas para las tres primeras componentes se muestra en la Tabla 3.5, con el formato anterior.

La primera componente representa el 36% de la varianza. Guarda relación positiva relevante con los arcos (34-14) y (16-32), su valor máximo es 0.14; guarda relación negativa con la mayoría de los arcos, siendo los más relevantes son (33-32), (31-30), (33-15) y (31-17). Este sugiere que existe gran afluencia de tráfico por la Av. Cevallos en ambos sentidos, y sus transversales, tomándolas como vías de salida de la red. Respecto a la segunda componente, guarda relación positiva relevante con los arcos (17-18), (15-14), (14-34), (34-35) y (39-40); y negativa relevante con los arcos (18-17), (17-16), (16-15), (14-15), (34-14), (35-34) y (44-35). En esta ocasión, las relaciones más relevantes, tanto positivas como negativas, marcan claramente rutas muy utilizadas tanto para ingresar como para salir de la red, lo que sugiere que tiene mayor volumen de tráfico en los arcos mencionados. De hecho, dichos arcos están ubicados en las principales calles de la red3: calle Bolívar, Av. 12 de Noviembre y Av. Unidad Nacional.

Arco	PC1	PC2	PC3
X40.41	-0,22	0,07	0,16
X41.42	-0,22	0,06	0,16
X42.43	-0,12	0,09	0,28
X44.43	-0,18	-0,11	0,16
X36.37	-0,22	-0,02	-0,25
X37.38	-0,17	-0,16	-0,07
X38.39	-0,22	-0,14	-0,04
X34.33	-0,18	-0,04	0,12
X33.32	-0,23	-0,04	-0,06
X32.31	-0,20	-0,11	0,06
X31.30	-0,24	-0,10	0,03
X18.17	0,00	-0,26	0,07
X17.18	-0,18	0,15	0,03
X16.17	-0,17	0,09	0,13
X17.16	0,02	-0,27	0,09
X15.16	-0,17	0,10	0,14
X16.15	0,04	-0,22	0,22
X14.15	0,04	-0,27	-0,14
X15.14	-0,01	0,20	0,05
X14.34	0,05	0,19	0,05
X34.14	0,13	-0,26	-0,07
X34.35	0,08	0,17	0,02
X35.34	-0,01	-0,35	-0,01
X35.44	-0,01	0,12	0,00
X44.35	0,06	-0,29	-0,09
X43.36	-0,22	0,03	0,05
X36.43	-0,14	-0,04	-0,36
X36.33	-0,22	0,02	0,05
X33.36	-0,14	-0,04	-0,36
X33.15	-0,23	0,02	0,06
X15.33	-0,11	-0,03	-0,40
X16.32	0,14	-0,14	0,25
X32.37	0,09	-0,17	0,26
X37.42	0,04	-0,20	0,22
X41.38	-0,21	-0,03	0,01
X38.31	-0,22	-0,06	0,00
X31.17	-0,24	-0,07	0,01
X18.30	-0,08	-0,19	0,06
X30.39	-0,15	-0,19	0,06
X39.40	-0,13	0,17	0,10

Tabla 3.5. Matriz de resultados de la componentes elegidas(red3)

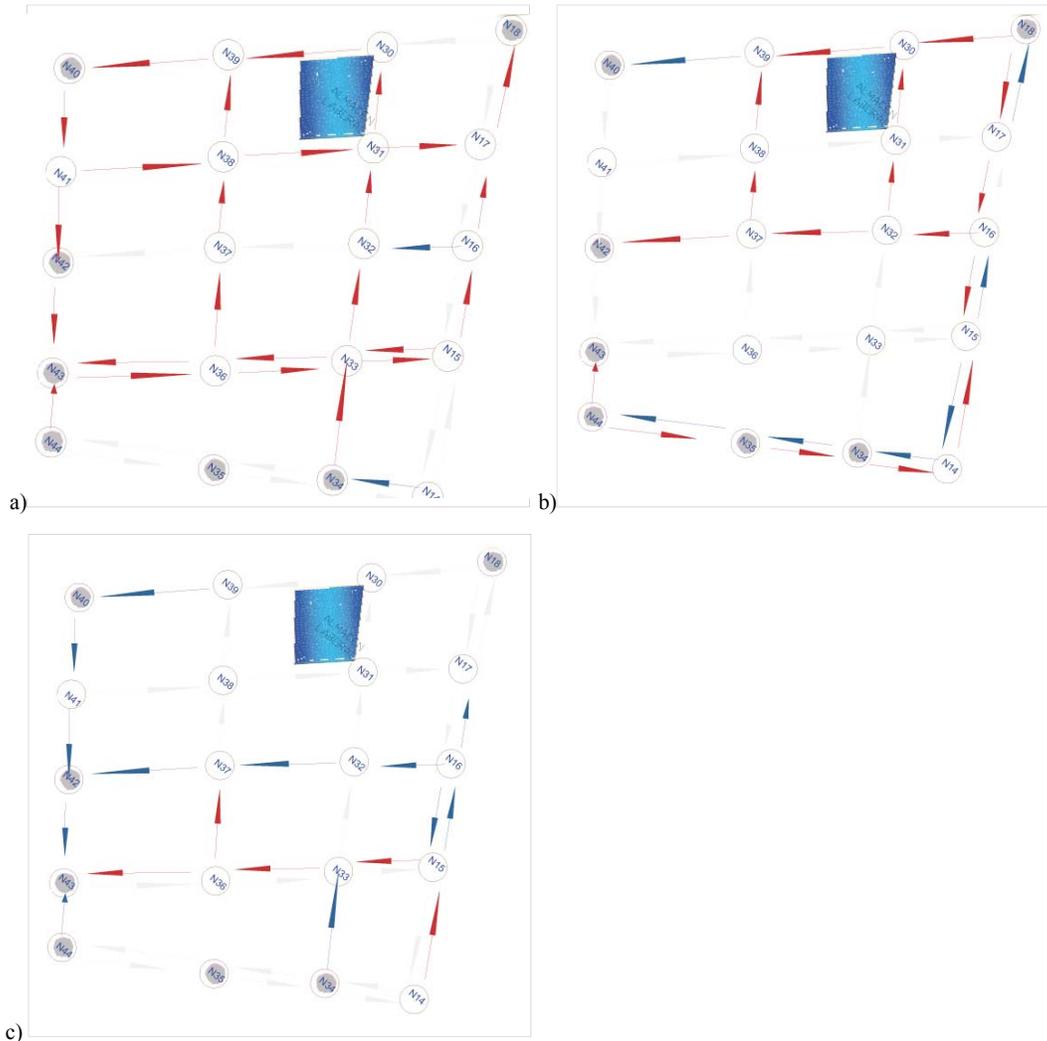


Figura 3.14. Gráfica de las Componentes Principales 1,2 y 3 (Red 3)

Finalmente la componente PC3 tiene relación positiva relevante con los arcos (42-43), (16-15), (16-32), (32-37) y (37-42) y negativa relevante con los arcos (36-37), (36-43), (33-36) y (15-33). Al igual que la componente anterior, marca dos rutas, coincidiendo con las usadas frecuentemente en la ciudad: la Av. Cevallos, por donde circulan vehículos de transporte público, de carga y particulares, y la calle 1ra. Imprenta, por la que ingresan, en su gran mayoría, vehículos livianos como taxis y particulares. En la Figura 3.14 a), b) y c) podemos observar las gráficas de las componentes 1, 2 y 3, respectivamente.

3.3.4. Componentes principales en la sección 4 de red

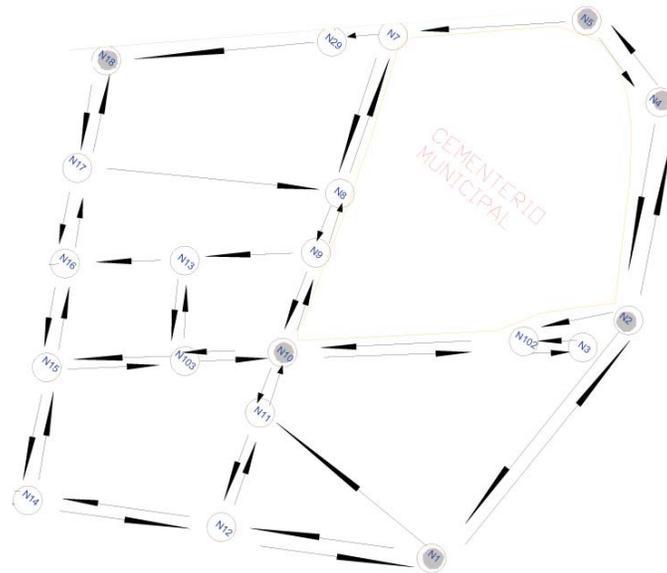


Figura 3.15. Esquema de la sección Red 4

En la Figura 3.15 se muestra la sección 4 de red, mientras que en la Figura 3.16 se muestran los resultados después de aplicar ACP a los datos de esta subred. Para esta sección se han seleccionado las cuatro primeras componentes, que explican un 69% de la variación, ya que el resto de componentes tienen relevancia más baja. La matriz de cargas para las cuatro primeras componentes se muestra en la Tabla 3.6, con el mismo formato anterior.

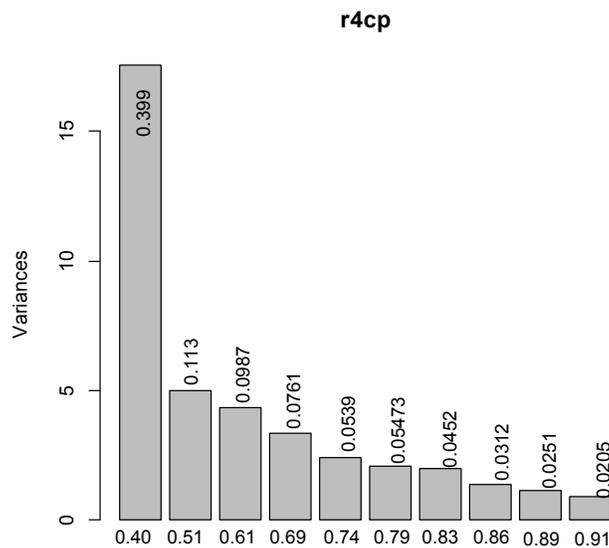


Figura 3.16. Gráfico de barras de las varianzas explicadas por componentes principales(red4)

Arco	PC1	PC2	PC3	PC4
X18.17	-0,06	-0,16	0,30	0,07
X17.18	0,14	-0,21	+0,18	-0,02
X16.17	0,11	-0,21	+0,15	-0,05
X17.16	-0,11	-0,13	0,26	0,11
X15.16	0,11	-0,21	+0,15	-0,04
X16.15	-0,14	-0,04	0,14	-0,04
X14.15	0,00	-0,01	0,33	0,01
X15.14	0,06	-0,09	+0,17	0,30
X103.13	0,15	0,20	-0,01	0,13
X13.103	0,20	-0,02	+0,08	0,08
X11.12	0,23	0,02	0,00	-0,04
X12.11	0,01	0,01	0,03	-0,31
X10.11	0,22	0,03	-0,01	-0,06
X11.10	0,11	0,27	0,12	-0,15
X9.10	0,21	-0,11	+0,06	-0,12
X10.9	0,15	0,28	0,11	-0,09
X8.9	0,21	-0,11	+0,06	-0,12
X9.8	0,15	0,27	0,11	-0,09
X7.8	0,21	-0,12	+0,06	-0,10
X8.7	0,19	0,19	0,08	-0,11
X1.2	0,08	-0,26	0,14	-0,10
X2.1	0,12	-0,08	0,09	-0,06
X2.4	-0,09	-0,07	0,24	-0,30
X4.2	0,12	-0,19	0,07	0,04
X4.5	-0,04	-0,03	0,31	-0,30
X5.4	0,15	-0,13	+0,07	-0,28
X1.12	0,14	-0,09	0,24	-0,05
X12.1	0,12	-0,11	0,14	0,33
X12.14	0,14	-0,09	0,24	-0,05
X14.12	0,12	-0,11	0,14	0,32
X1.11	0,18	-0,04	0,03	0,06
X2.102	0,19	-0,05	+0,06	0,11
X102.10	0,18	-0,03	-0,05	0,18
X10.102	0,15	0,27	0,09	0,03
X10.103	0,21	0,05	-0,01	0,06
X103.10	0,07	0,29	0,09	0,15
X103.15	0,21	0,05	-0,01	0,06
X15.103	0,07	0,29	0,09	0,15
X9.13	0,23	0,03	0,00	-0,10
X13.16	0,23	0,06	0,00	-0,05
X17.8	0,21	-0,10	+0,05	-0,13
X5.7	-0,09	0,01	0,05	0,06
X7.29	0,08	-0,14	0,30	0,15
X29.18	0,08	-0,14	0,30	0,15

Tabla 3.6. Matriz de resultados de las componentes elegidas(red4)

En la Figura 3.17 a), b), c) y d) se muestran las componentes 1, 2, 3 y 4 respectivamente. La primera componente PC1 representa el 40% de la varianza, guarda relación positiva relevante con los arcos (13-103), (11-12), (10-11), (9-10), (8-9), (7-8), (10-103), (103-15), (9-13), (13-16) y (17-8); y relación negativa relevante con los arcos (17-16), (16-15), (2-4) y (5-7). Sugiere que existe gran afluencia de tráfico por la calle Abdón Calderón

y, nuevamente, confirma que la Av. Cevallos es una de las más utilizadas para movilizarse a través de la red de estudio.

La segunda componente PC2 guarda relación positiva relevante con los arcos (103-13), (11-10), (10-9), (9-8), (10-102), (103-10) y (15-103), y negativa relevante con los arcos (17-18), (16-17), (15-16), (1-2) y (4-2). Nuevamente en esta componente se sugieren las mismas rutas que la cp1. Adicionalmente, agrega rutas posibles de salida de la red, especialmente la comprendida entre los nodos 15 al 18, que se refiere a la Av. Unidad Nacional.

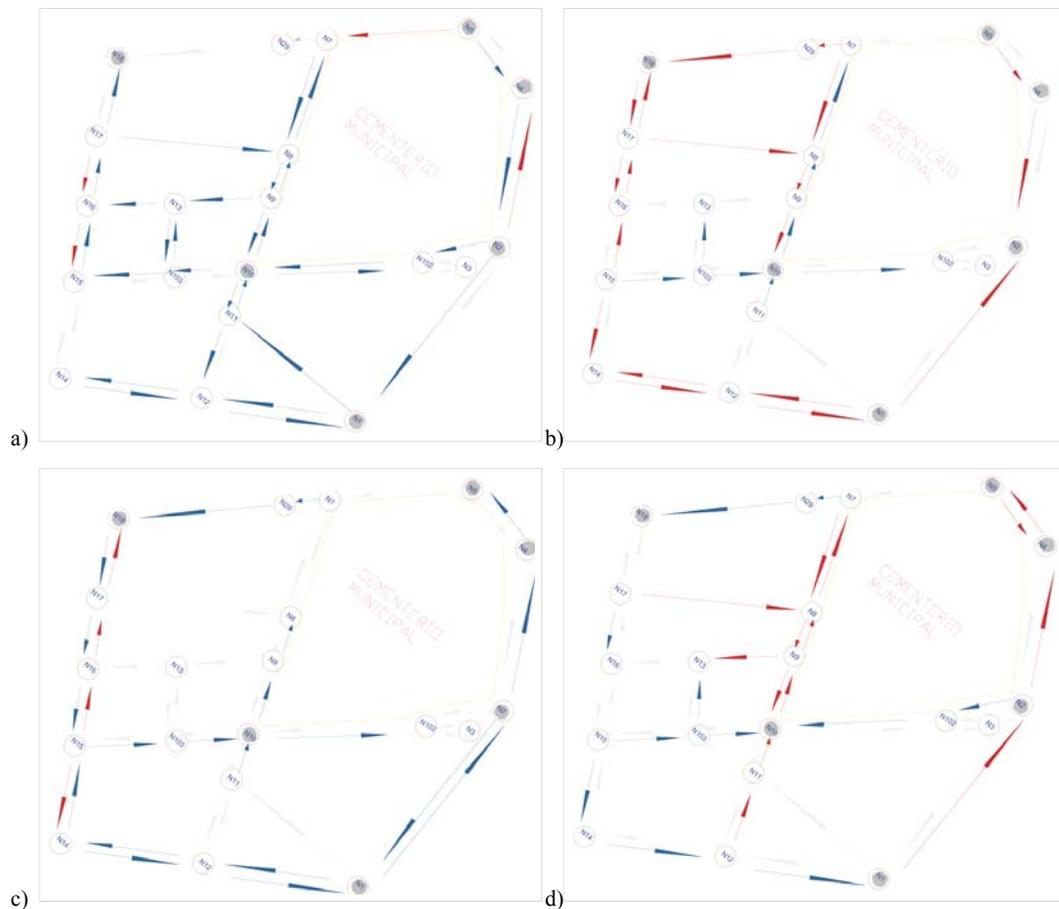


Figura 3.17. Gráfica de las Componentes Principales 1,2, 3 y 4 (Red 4)

La tercera componente PC3 guarda relación positiva relevante con los arcos (18-17), (17-16), (14-15), (2-4), (4-5), (1-12), (12-14), (7-29) y (29-18); y negativa relevante con los arcos (17-18), (16-17), (15-16) y (15-14). Sugiere una de la principales vías por las que

ingresa gran parte de flujo vehicular, especialmente el límite de la red comprendido entre los nodos 1, 2, 4 y 5 y 1, 12 y 14 en ambos sentidos, y ratifica como vía de salida y entrada de vehículos la comprendida entre los nodos 14 al 18. Finalmente la componente PC4, tiene relación positiva relevante con los arcos (15-14), (12-1) y (14-12). Guarda relación negativa relevante con los arcos (12-11), (2-4), (4-5) y (5-4). Esto ratifica lo expuesto en las anteriores componentes, pues las vías de salida más utilizadas son los límites de esta red.

Se puede concluir que después de haber aplicado el ACP individualmente a las 4 subredes y la red ejemplo en el segundo, varios de los denominados puntos de mayor incidencia de cada subred son comunes. Por lo tanto, al unir las se determinan los nodos en los que hay que poner mayor cuidado en el momento de tomar decisiones respecto a la planificación del tráfico.

3.4. MDLs para predicción de la saturación

En lo que respecta a los MDLs para predicción de la saturación, se han aplicado de la misma manera explicada en las Secciones 2.6.3 y 2.6.4, con los que se han determinado el orden polinómico para el MDL genérico mediante la función de autocorrelación ACF, las predicciones de flujo para los siguientes períodos de tiempo de cada arco en cada uno de los horarios, al igual que las probabilidades de saturación, como se ilustra para el arco 62-74, en el que se aprecia la alta probabilidad de saturación en todo el arco.

Como se puede observar en las Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20, el modelo de predicción aplicado en las diferentes bandas horarias se ajusta adecuadamente a la línea de tendencia de los flujos vehiculares y todas se encuentran dentro de las bandas predictivas al 95%. Respecto a las probabilidades de saturación, se observa claramente que son altas todo el tiempo en los horarios de la mañana y el medio día. Para el de la tarde y noche varía en ciertos períodos de tiempo, bajando en algunos momentos, aunque manteniéndose siempre sobre el 70%.

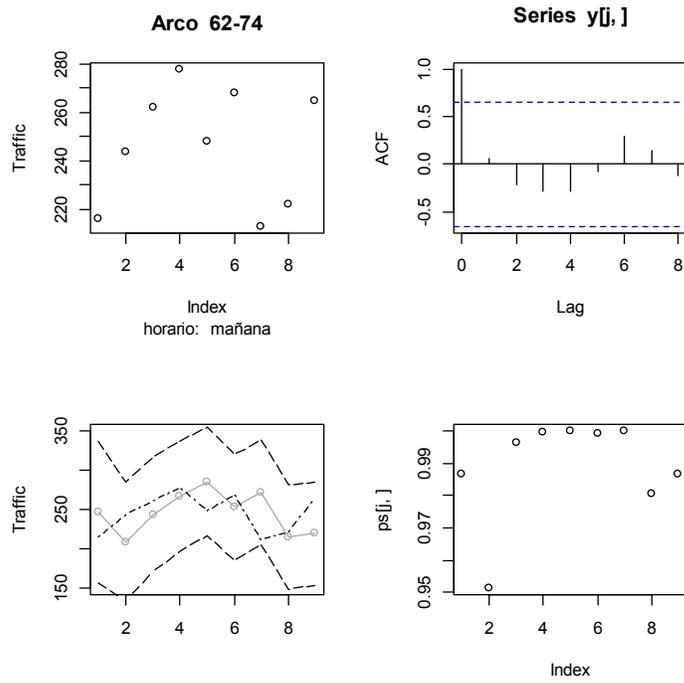


Figura 3.18. DLM de predicción y saturación del arco 62-74 (horario: mañana)

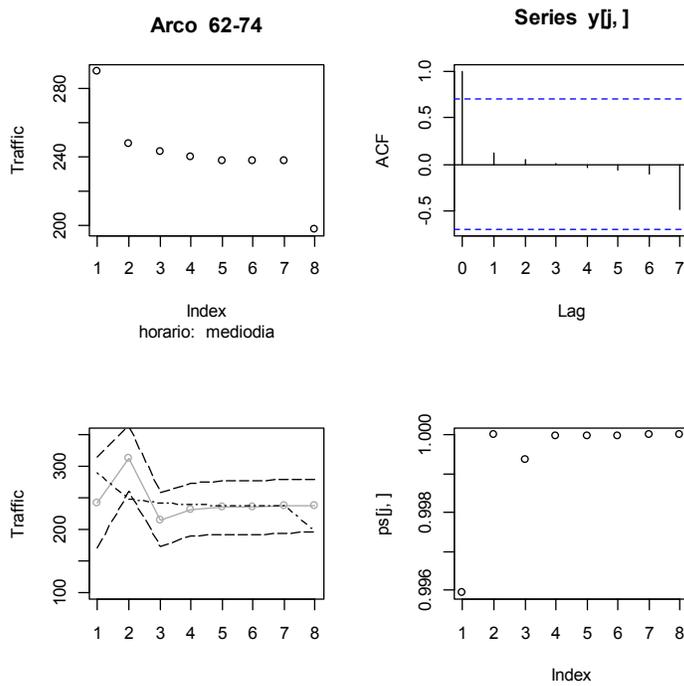


Figura 3.19. DLM y saturación del arco 62-74 (horario: mediodía)

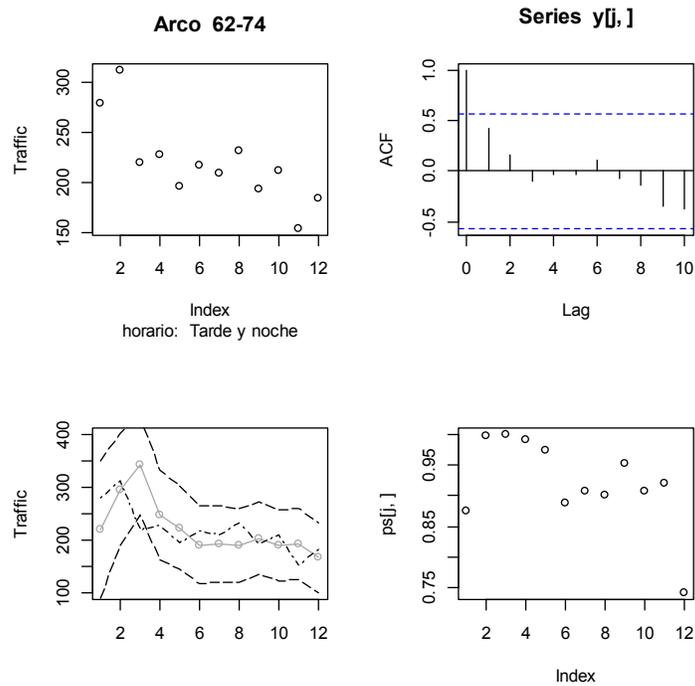


Figura 3.20. DLM y saturación del arco 62-74 (horario: tarde y noche)

En la Figura 3.21 se observan los resultados después de aplicar las ACP y los DLM's a la red de estudio, mostrando en conjunto los puntos calientes en color amarillo, en donde existe una alta afluencia vehicular. También se pueden observar los arcos con mayor probabilidad de saturación en los diferentes horarios. De esta forma, se identifican rápidamente lugares donde debería, probablemente, actuarse para mejorar el tráfico.

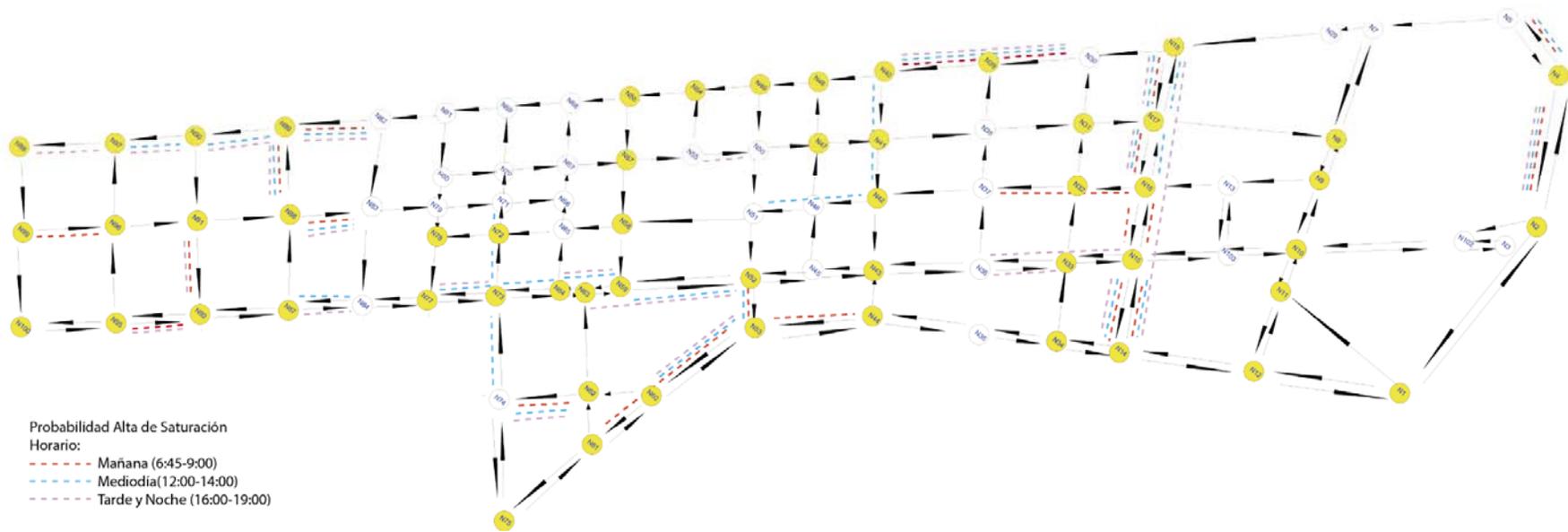


Figura 3.21. Gráfico de resultados (Puntos calientes y Arcos con alta probabilidad de saturación)

3.5. Flujos OD Dinámicos

Para concluir este capítulo, en esta sección aplicamos los conceptos de flujos OD dinámicos a la red extendida.

En primer lugar identificamos los pares OD del problema. Como tenemos 86 nodos, potencialmente se dan $86(86 - 1) = 7310$ pares OD. Un análisis de direcciones viales permitidas reduce las posibilidades a 3724. De éstas, se han excluido los pares OD que afectan a menos de 10 tramos, pues, en principio, no parecería necesario el uso de vehículos en tales rutas, con lo que se reducen a 725 posibilidades.

N°	O - D	Rutas														
		4	5	7	29	18	30	39	40	41	42	46	51	58		
1	4 - 58	4	5	7	29	18	30	39	40	41	42	46	51	58		
2	4 - 59	4	2	102	10	103	15	33	36	43	45	52	59			
3	5 - 59	5	7	29	18	30	39	40	41	42	46	51	58	59		
4	5 - 60	5	7	8	9	10	103	15	33	36	43	45	52	53	60	
5	63 - 2	63	59	52	53	44	35	34	14	12	1	2				
6	64 - 2	64	63	59	52	53	44	35	34	14	12	1	2			
7	73 - 2	73	64	63	59	52	53	44	35	34	14	12	1	2		
8	73 - 7	73	64	63	59	52	45	43	36	33	15	103	10	9	8	7

Tabla 3.7. Rutas habituales OD

Finalmente, varias de las secuencias de arcos que conforman las rutas restantes son comunes, por lo que en función del número de repeticiones de esas secuencias, se tomaron en cuenta las de mayor frecuencia, tomándolas como rutas preferenciales. En conjunto con la información aportada por el análisis de componentes principales de la Sección 3.3, se redujeron considerablemente, centrándonos en los 8 pares descritos en la Tabla 3.7 que incluye sólo la ruta más habitual entre el origen y el destino correspondiente. La Tabla 3.8 contiene la correspondiente matriz de enrutamiento.

Arcos			Rutas O-D							
			X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Y1	1	2	0	0	0	0	1	1	1	0
Y2	2	102	0	1	0	0	0	0	0	0
Y3	4	2	0	1	0	0	0	0	0	0
Y4	4	5	1	0	0	0	0	0	0	0
Y5	5	7	1	0	1	1	0	0	0	0
Y6	7	8	0	0	0	1	0	0	0	0
Y7	7	29	1	0	1	0	0	0	0	0
Y8	8	7	0	0	0	0	0	0	0	1
Y9	8	9	0	0	0	1	0	0	0	0
Y10	9	8	0	0	0	0	0	0	0	1
Y11	9	10	0	0	0	1	0	0	0	0
Y12	10	9	0	0	0	0	0	0	0	1
Y13	10	103	0	1	0	1	0	0	0	0
Y14	12	1	0	0	0	0	1	1	1	0
Y15	14	12	0	0	0	0	1	1	1	0
Y16	15	33	0	1	0	1	0	0	0	0
Y17	15	103	0	0	0	0	0	0	0	1
Y18	18	30	1	0	1	0	0	0	0	0
Y19	29	18	1	0	1	0	0	0	0	0
Y20	30	39	1	0	1	0	0	0	0	0
Y21	33	15	0	0	0	0	0	0	0	1
Y22	33	36	0	1	0	1	0	0	0	0
Y23	34	14	0	0	0	0	1	1	1	0
Y24	35	34	0	0	0	0	1	1	1	0
Y25	36	33	0	0	0	0	0	0	0	1
Y26	36	43	0	1	0	1	0	0	0	0
Y27	39	40	1	0	1	0	0	0	0	0
Y28	40	41	1	0	1	0	0	0	0	0
Y29	41	42	1	0	1	0	0	0	0	0
Y30	42	46	1	0	1	0	0	0	0	0
Y31	43	36	0	0	0	0	0	0	0	1
Y32	43	45	0	1	0	1	0	0	0	0
Y33	44	35	0	0	0	0	1	1	1	0
Y34	45	43	0	0	0	0	0	0	0	1
Y35	45	52	0	1	0	1	0	0	0	0
Y36	46	51	1	0	1	0	0	0	0	0
Y37	51	58	1	0	1	0	0	0	0	0
Y38	52	45	0	0	0	0	0	0	0	1
Y39	52	53	0	0	0	1	1	1	1	0
Y40	52	59	0	1	0	0	0	0	0	0
Y41	53	44	0	0	0	0	1	1	1	0
Y42	53	60	0	0	0	1	0	0	0	0
Y43	59	52	0	0	0	0	1	1	1	1
Y44	63	59	0	0	0	0	1	1	1	1
Y45	64	63	0	0	0	0	0	1	1	1
Y46	73	64	0	0	0	0	0	0	1	1
Y47	102	10	0	1	0	0	0	0	0	0
Y48	103	10	0	0	0	0	0	0	0	1
Y49	103	15	0	1	0	1	0	0	0	0

Tabla 3.8. Matriz de enrutamiento

El modelo gráfico asociado al correspondiente modelo probabilístico es:

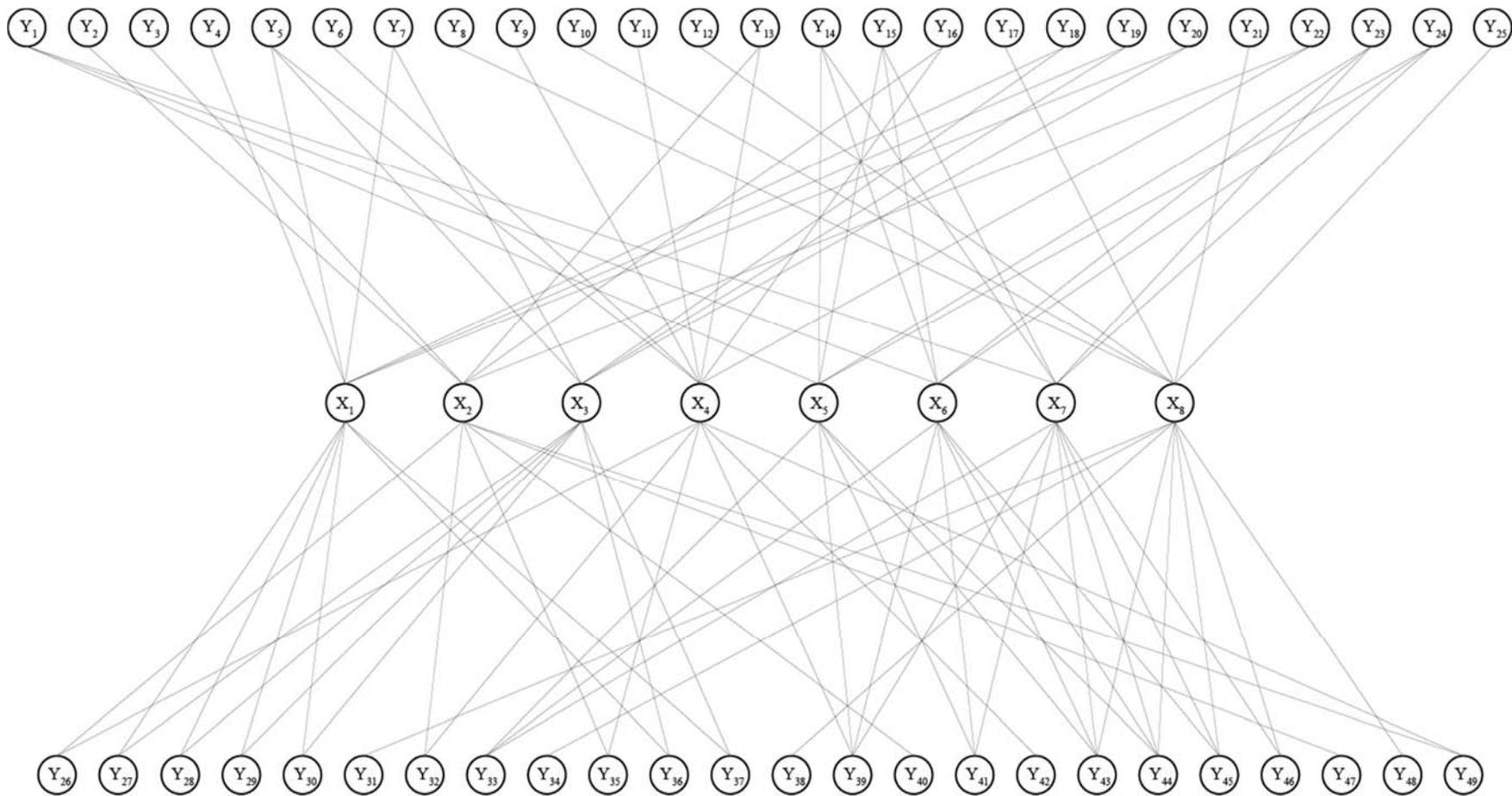


Figura 3.22. Modelo gráfico

En cierto instante, tenemos las siguientes predicciones de los arcos, provenientes de los MDL's de la Sección 3.4

	μ_i	σ_i
Y ₁	208	27
Y ₂	56	10
Y ₃	265	48
Y ₄	248	61
Y ₅	112	31
Y ₆	16	5
Y ₇	92	9
Y ₈	43	12
Y ₉	41	13
Y ₁₀	34	12
Y ₁₁	46	14
Y ₁₂	38	13
Y ₁₃	49	16
Y ₁₄	173	23
Y ₁₅	169	23
Y ₁₆	112	52
Y ₁₇	72	29
Y ₁₈	108	10
Y ₁₉	92	9
Y ₂₀	144	14
Y ₂₁	104	19
Y ₂₂	119	45
Y ₂₃	138	29
Y ₂₄	182	27
Y ₂₅	109	20

	μ_i	σ_i
Y ₂₆	95	36
Y ₂₇	69	24
Y ₂₈	32	19
Y ₂₉	36	20
Y ₃₀	56	13
Y ₃₁	137	23
Y ₃₂	142	39
Y ₃₃	161	19
Y ₃₄	93	20
Y ₃₅	128	34
Y ₃₆	76	29
Y ₃₇	45	20
Y ₃₈	115	27
Y ₃₉	145	27
Y ₄₀	92	20
Y ₄₁	124	18
Y ₄₂	283	35
Y ₄₃	179	43
Y ₄₄	161	40
Y ₄₅	144	38
Y ₄₆	144	38
Y ₄₇	40	12
Y ₄₈	82	29
Y ₄₉	54	16

Tabla 3.9. Predicciones de los arcos

En este caso, truncaremos por la izquierda en $Y_j \leq 0$ las predicciones correspondientes.

La matriz β es, en este caso, suponiendo una a priori no informativa y sin información adicional de expertos

Arcos			Rutas O-D							
			X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Y1	1	2	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0
Y2	2	102	0	1	0	0	0	0	0	0
Y3	4	2	0	1	0	0	0	0	0	0
Y4	4	5	1	0	0	0	0	0	0	0
Y5	5	7	1/3	0	1/3	1/3	0	0	0	0
Y6	7	8	0	0	0	1	0	0	0	0
Y7	7	29	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y8	8	7	0	0	0	0	0	0	0	1
Y9	8	9	0	0	0	1	0	0	0	0
Y10	9	8	0	0	0	0	0	0	0	1
Y11	9	10	0	0	0	1	0	0	0	0
Y12	10	9	0	0	0	0	0	0	0	1
Y13	10	103	0	1/2	0	1/2	0	0	0	0
Y14	12	1	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0
Y15	14	12	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0
Y16	15	33	0	1/2	0	1/2	0	0	0	0
Y17	15	103	0	0	0	0	0	0	0	1
Y18	18	30	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y19	29	18	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y20	30	39	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y21	33	15	0	0	0	0	0	0	0	1
Y22	33	36	0	1/2	0	1/2	0	0	0	0
Y23	34	14	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0
Y24	35	34	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0
Y25	36	33	0	0	0	0	0	0	0	1
Y26	36	43	0	1/2	0	1/2	0	0	0	0
Y27	39	40	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y28	40	41	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y29	41	42	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y30	42	46	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y31	43	36	0	0	0	0	0	0	0	1
Y32	43	45	0	1/2	0	1/2	0	0	0	0
Y33	44	35	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0
Y34	45	43	0	0	0	0	0	0	0	1
Y35	45	52	0	1/2	0	1/2	0	0	0	0
Y36	46	51	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y37	51	58	1/2	0	1/2	0	0	0	0	0
Y38	52	45	0	0	0	0	0	0	0	1
Y39	52	53	0	0	0	1/4	1/4	1/4	1/4	0
Y40	52	59	0	1	0	0	0	0	0	0
Y41	53	44	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0
Y42	53	60	0	0	0	1	0	0	0	0
Y43	59	52	0	0	0	0	1/4	1/4	1/4	1/4
Y44	63	59	0	0	0	0	1/4	1/4	1/4	1/4
Y45	64	63	0	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3
Y46	73	64	0	0	0	0	0	0	1/2	1/2
Y47	102	10	0	1	0	0	0	0	0	0
Y48	103	10	0	0	0	0	0	0	0	1
Y49	103	15	0	1/2	0	1/2	0	0	0	0

Tabla 3.10. Predicciones de porcentajes desviados por arcos

Para acabar, las distribuciones a priori sobre los flujos X son:

	μ_i	σ_i
X ₁	662	55
X ₂	804	80
X ₃	411	37
X ₄	808	62
X ₅	510	51
X ₆	554	50
X ₇	623	52
X ₈	1031	74

Tabla 3.11. Distribuciones sobre X

Las probabilidades respectivas de saturación obtenidas en los 8 pares OD se muestran en la Tabla 3.12.

OD	Prob. Saturación
X ₁	0.9785
X ₂	0.6386
X ₃	0.9883
X ₄	0.0852
X ₅	0.9723
X ₆	0.9906
X ₇	0.9964
X ₈	0.9164

Tabla 3.12. Probabilidades de saturación en las rutas OD

Como puede observarse se da saturación con alta probabilidad en las rutas X₁, X₃, X₅, X₆, X₇ y X₈, sugiriendo, de nuevo, rutas en las que sería conveniente centrarse los esfuerzos de intervención y planificación de tráfico.

3.6. Conclusiones

En este capítulo hemos ilustrado los métodos introducidos en el Capítulo 2 sobre una red de tamaño realista para verificar su escalabilidad:

- Respecto a la imputación de datos se ha implementado mediante la distribución beta-binomial tomando como punto de partida los flujos vehiculares

contabilizados previamente, lo que ha permitido completar en la mayoría de los casos, aunque en algunos la falta de información ha imposibilita la aplicación de esta aproximación. Una posibilidad en este caso sería acudir directamente a métodos basados en juicios de expertos.

- Los ACP's son muy útiles. Sin embargo, para emplearlos se sugiere el análisis en subredes por lo que es necesario cortar en partes la red de estudio. La cantidad de divisiones dependerá del tamaño total de la misma. De no hacerlo pueden obtenerse componentes de difícil interpretación.
- Los MDL's son muy potentes, pero aportan información solo en los puntos de recogida de datos.
- La combinación entre los ACP's con los MDL's es muy potente, porque permite identificar puntos calientes dentro de la red y las probabilidades de saturación en sus diferentes arcos, con lo que se pueden obtener datos muy importantes como muestra el gráfico de la Figura 3.21.
- Los OD Dinámicos normalmente parten de muchas rutas al tomar cada nodo como origen y destino. Sin embargo, mediante técnicas de reducción como algoritmos de detección de rutas más cortas, estableciendo preferencias y restricciones, entre otras, se pueden reducir considerablemente ayudando a identificar los problemas más críticos en la red.

Concluimos tras haber aplicado el ACP individualmente a las cinco subredes en este capítulo, que varios de los denominados puntos de mayor incidencia de cada subred son comunes. Por lo tanto, al unirlos se determinan los nodos en los que habría que poner mayor cuidado para tomar decisiones respecto a la planificación del tráfico. Además, el modelo que determina las probabilidades de saturación ayuda a saber en qué momento el tráfico empezará a presentar mayores problemas de congestión.

En la Figura 3.21 se observan los resultados tras aplicar las ACP y los DLM a la red de estudio. Los nodos marcados con fondo amarillo son los nodos en donde se presenta mayor concentración de flujos vehiculares, indicando, en conjunto, las rutas más

utilizadas por los conductores como rutas de acceso o salida de zonas, en especial sus avenidas principales.

En la misma figura, también se observan líneas entrecortadas junto a los arcos con alta probabilidad de saturación. Las líneas en color rojo corresponden al horario de la mañana, color celeste al horario del medio día y lila a la tarde y noche. Todos los arcos poseen un alto flujo vehicular. Sin embargo, como se visualiza, existen varios de ellos que podrían estar saturados durante los tres horarios punta, por lo que se deberían tomar medidas (eliminar carriles asignados para estacionamiento, crear nuevas rutas para autobuses, sincronizar mejor el sistema semafórico implantado hace poco tiempo, ...) con el fin de aliviar los problemas existentes.

Finalmente, el modelo de predicción de flujos OD dinámicos, ha ayudado a determinar las rutas de mayor conflicto dentro de la red vial, lo que define con mayor claridad los sectores en los que se deberían aplicar las posibles intervenciones de tráfico para ayudar a mejorar los flujos en las rutas OD que afectan a la zona de estudio.

En el siguiente capítulo, se tratará en detalle métodos de simulación-optimización que ayudan a determinar el conjunto de intervenciones aplicables al conjunto de rutas OD obtenidas a partir de los métodos explicados en este capítulo.

CAPITULO 4

MODELO DE SIMULACIÓN-OPTIMIZACIÓN PARA LA EXPANSIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO

4.1. Introducción

En los capítulos anteriores hemos introducido y combinado varios métodos para estimar, predecir y determinar problemas a corto plazo en la gestión de tráfico en una ciudad, ilustrándolos en la ciudad de Ambato. Esto nos permite identificar zonas donde se debe actuar para mejorar la situación del tráfico en la misma, tanto local como globalmente, y estar alerta frente a tales situaciones previsibles. Para ello, podemos tener preparado un conjunto de intervenciones de tráfico para paliar la situación que, eventualmente, se pueda producir. En este capítulo, describimos métodos de simulación-optimización que nos ayudan a identificar las intervenciones que emergerán como las mejores respecto a cierto criterio que optimizaremos.

La simulación es una técnica de modelización aplicada profusamente en la gestión de tráfico, véase, por ejemplo, Manivannan (1998), Mabry y Gaudiot (1994), Odoni et al. (1994) o Helbing et al. (2001). Existe, además, abundante software de simulación de tráfico que suele dividirse en microscópico (como, por ejemplo, RoadTrafficSimulator, Aimsun o Cube Dynasim), que estudia elementos individuales de un sistema de transporte como la dinámica de vehículos individuales y el comportamiento individual de los viajeros; macroscópico, (como, por ejemplo, Aimsun, DYNEV o TransModeler), que se ocupa de las características agregadas de elementos de transporte, como la dinámica del

flujo de tráfico global y el análisis de la demanda de viajes a nivel zonal; o, finalmente, mesoscópico (como, por ejemplo, Aimsun, Cube Avenue o DYNASMART) que analiza los elementos de transporte en pequeños grupos, en el que los elementos se consideran homogéneos. El énfasis en este campo se ha puesto en el uso de la simulación de sucesos discretos, especialmente en el caso microscópico.

En nuestro caso, consideraremos una aproximación basada en el modelo estocástico genérico de predicción de flujo de tráfico definido en las Secciones 2.6 y 2.7. Introduciendo modificaciones adecuadas en tales modelos asociados a intervenciones de tráfico, seremos capaces de simular políticas de mejora que nos ayuden a decidir la intervención más apropiada, en cada instante, como desarrollamos e ilustramos en este capítulo.

4.2. Esquema de simulación-optimización

En esta sección describimos el modelo de simulación-optimización que emplearemos. Consideramos un instante $t-1$ particular. A partir de los modelos de la Sección 2.6 disponemos de la distribución predictiva de flujos en las rutas en las que realizamos mediciones³

$$p(Y_t|D_{t-1}).$$

Los modelos de la Sección 2.7 parten de

$$p(X_t|D_{t-1}), \text{ predicción a priori de los flujos OD,}$$

$$p(Y_t|X_t, D_{t-1}), \text{ predicción de las mediciones en los arcos dados los flujos OD.}$$

Tales modelos permiten construir las distribuciones

$$p(X_t|y_t, D_{t-1}), \text{ predicción de los flujos OD dada la medición } y_t,$$

³ La dependencia de los datos anteriores D_{t-1} no se ha hecho explícita hasta ahora. Aquí la hacemos para mostrar la evolución detallada del modelo.

que podemos utilizar como predicción a priori de los flujos OD en el siguiente instante, volviendo a comenzar el proceso con $D_t = (D_{t-1}, y_t)$. A partir de estos modelos, hemos descrito métodos para predecir la saturación en los puntos de medición, en las rutas OD, en otros puntos y, finalmente, en el conjunto de la red.

Supongamos que detectamos saturación, como ha ocurrido en los casos de los Capítulos 2 y 3 aplicando estos métodos. Entonces, nos planteamos actuar para mejorar el tráfico a través de un conjunto de intervenciones que designamos $\lambda \in \Lambda$, donde Λ se refiere al conjunto factible de intervenciones, tal vez definidas por restricciones. Deseamos seleccionar la mejor intervención λ , según el criterio que definimos más abajo.

Para ello, procedemos como sigue. Cuando implementamos la intervención λ , esperamos tener un impacto sobre el tráfico, de forma que se modifiquen los flujos en los puntos de observación (simplificamos la notación eliminando la dependencia de D_{t-1}) pasando a

$$p(Y_t|\lambda),$$

y en los flujos OD, pasando a

$$p(X_t|Y_t, \lambda).$$

Desarrollamos entonces el siguiente esquema de simulación Montecarlo para predecir el impacto global de las medidas introducidas

$$\begin{array}{l} \text{Desde } i = 1 \text{ hasta } m \\ \{ \\ \quad \text{Generar } Y_i \sim p(Y_t|\lambda) \\ \quad \text{Generar } X_i \sim p(X_t|Y_i, \lambda) \\ \} \end{array}$$

Este esquema aporta una muestra $\{Y_i\}_{i=1}^m$ de los flujos en los puntos de observación y una muestra $\{X_i\}_{i=1}^m$ de flujos OD cuando se ha implantado la medida λ . Con estas muestras podemos proceder a la evaluación de las saturaciones en puntos de observación, rutas OD y zonas urbanas en general.

Así, si definimos una función g de evaluación basada en la muestra y $h(\lambda) = g(\{y_i\}, \{x_i\}, \lambda)$, tendremos que resolver el problema

$$\text{opt}_{\lambda \in \Lambda} h(\lambda).$$

Típicamente, h se corresponderá a la aproximación Montecarlo de una utilidad esperada que dependerá de los flujos X e Y .

En efecto, en general, se tratará de obtener una función de utilidad g , de la forma $g(y, x, \lambda)$, de manera que se intente encontrar la intervención λ que maximice la utilidad esperada $E_{X|\lambda, Y|\lambda}(g(Y, X, \lambda))$. Como ésta será típicamente de cálculo complejo, se hará la aproximación Montecarlo $h(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(y_i, x_i, \lambda)$, como habíamos anunciado.

En función de cómo sea Λ , podremos optar por varias aproximaciones, véase por ejemplo Herderson y Nelson (2006) o Ríos Insua et al (2008), que aportan introducciones a la combinación de métodos de simulación y optimización:

- Cuando Λ es continuo, podríamos utilizar
 - Un algoritmo que sólo requiera evaluaciones de la función objetivo como el de Nelder-Mead (Lagarias, et al., 1998).
 - Evaluar h en varias alternativas $\lambda_1, \dots, \lambda_s$ para obtener

$$(\lambda_1, h(\lambda_1)), \dots, (\lambda_s, h(\lambda_s)).$$

Ajustar a esos puntos una superficie $\hat{h}(\lambda)$ y resolver el problema de optimización con el metamodelo

$$\text{opt}_{\lambda \in \Lambda} \hat{h}(\lambda)$$

- Cuando Λ es discreto, podríamos utilizar un método del tipo ranking & selection o de comparaciones múltiples para encontrar la intervención óptima, véase Herderson y Nelson (2006). Puede ocurrir que, aunque discreto, Λ sea de alto tamaño, con lo que tengamos que optar, de nuevo, por una aproximación basada en un metamodelo.

4.3. El impacto de las intervenciones

Sin ser exhaustivos, y como mera ilustración, comenzamos analizando el impacto de algunas de las intervenciones típicas que se plantean en nuestro caso, que se corresponden, recordemos, a intervenciones rápidas. Estas incluyen:

- *Aumento de la capacidad de tráfico en una manzana o en una ruta OD.*
Esencialmente, esto se puede conseguir de dos maneras:
 - Aumentar el número de carriles en cierta dirección, si son reversibles.
 - Prohibir el aparcamiento en la vía, utilizando el carril adicional para tránsito.

Efectivamente, esto induciría el aumento de uno o más carriles, en la manzana o en la ruta correspondiente, aumentando la capacidad de tráfico, con lo que se reduciría la probabilidad de saturación.

- *Aumento de la capacidad de transporte público*, aumentando la frecuencia de los autobuses que pasan por la manzana o ruta OD de interés. Esencialmente, esto conllevaría trasladar parte del tráfico en coches a autobuses, con lo que, de nuevo, se reduciría la probabilidad de saturación de tráfico.
- *Reducir el tráfico*, bien prohibiendo ciertos tipos de tráfico en rutas, bien trasladando parte del tráfico a otras rutas, bien restringiendo tráfico globalmente, por ejemplo, usando un criterio basado en las matrículas de los vehículos, como luego describimos.

Otras medidas posibles serían mejorar la calidad del servicio del transporte público (siendo ésta una medida más a medio plazo) o cambiar la sincronización del sistema semafórico (siendo ésta de difícil implantación en la ciudad de Ambato), por lo que no las consideramos en nuestra ilustración. Otras medidas más a largo plazo inducirían la relocalización de servicios, el cierre de la circulación en algunos sectores de la ciudad o

la regulación de horarios de entradas coincidentes en distintos servicios (colegios, bancos, instituciones públicas, por mencionar algunos).

Describimos ahora cuáles serían los efectos de estas intervenciones sobre los flujos de tráfico. Suponemos que, sin intervención, el tráfico actual Z en una ruta o arco se modeliza, aproximadamente, mediante una distribución $Z \sim N(\mu, \sigma^2)$ y que la capacidad de la misma es $\delta = k\delta_0$, donde k es el número de carriles disponibles y δ_0 es la capacidad por carril. Como antes, consideramos que la saturación se alcanza cuando el tráfico sobrepasa el 70% de su capacidad, con lo que utilizaremos

$$Pr(Z \geq 0.7\delta)$$

como medida del grado de saturación. Cuando esta probabilidad sea alta, se producirá saturación con alta probabilidad.

Entonces, los efectos de las medidas antes mencionadas serían:

- *Aumento de la capacidad de tráfico en una manzana o en una ruta OD mediante el aumento del número de carriles (λ_1).*

Bajo el tipo de intervención λ_1 , el tráfico es el mismo, es decir $Z|\lambda_1 \sim Z$, pero crece la capacidad de la ruta al aumentar el número de carriles. Así, si k pasa a ser k' , δ pasa a ser $\delta' = k'\delta_0$.

Obsérvese que $Pr(Z \geq 0.7\delta') \leq Pr(Z \geq 0.7\delta)$, mejorándose así el tráfico.

- *Aumento de la capacidad de transporte público (λ_2)*

Con este tipo de intervención, suponemos que cada autobús posibilita que r personas adicionales empleen el autobús, lo que induciría que s vehículos equivalentes menos circulen por la vía. Así, suponiendo fija la varianza, tenemos que, si k es el número de pasadas adicionales de autobús en el horario indicado,

$$Z|\lambda_2 \sim N(\mu - ks + 2.5k, \sigma^2),$$

pues cada autobús equivale a 2.5 vehículos livianos. Obsérvese que, siempre que $s > 2.5$, $Pr(Z \geq 0.7\delta|\lambda_2) \leq Pr(Z \geq 0.7\delta)$ mejorándose, en consecuencia, el tráfico. Típicamente habrá incertidumbre sobre s , pero nosotros ignoraremos este hecho en nuestro ejemplo.

- *Reducción de tráfico (λ_3)*

Un ejemplo típico de intervención con esta estrategia es prohibir que parte de los vehículos circulen por una zona, en períodos alternos. Por ejemplo, en ciertos días sólo pueden circular vehículos con matrícula acabada en par; en los restantes, vehículos con matrícula impar. Aunque, inicialmente podríamos pensar que esto conlleva que el tráfico se reduzca a la mitad, efectivamente será menor la reducción puesto que algunos conductores disponen de varios coches y otros emplearán taxis. Así, si ρ es el coeficiente de reducción (típicamente, $\rho > 1/2$) tendremos que

$$Z|\lambda_3 \equiv \rho Z \sim N(\rho\mu, \rho^2\sigma^2)$$

Obsérvese que $Pr(Z \geq 0.7\delta|\lambda_3) \leq Pr(Z \geq 0.7\delta)$ con lo que, de nuevo, mejora el tráfico. Igualmente, habría incertidumbre sobre ρ , pero nosotros no reflejaremos este hecho.

Fijémonos en que, basados en la discusión anterior, si ahora Z viniese determinada por una muestra $\{Z_i\}$ y $\{Z_i^j\}$ designasen a las muestras bajo el tipo de intervención $j=1, 2, 3$, quedaría entonces

$$\{Z_i^1\} \equiv \{Z_i\}$$

$$\{Z_i^2\} \equiv \{Z_i - ks + 2.5k\}$$

$$\{Z_i^3\} \equiv \{\rho Z_i\}$$

Así pues, vemos que no hace falta simular por cada intervención de los que queremos probar, sino que es posible emplear una sola simulación y, después, si es necesario, hacer las transformaciones correspondientes arriba indicadas. Esto induce ahorros considerables.

Para concluir esta sección, indiquemos que:

- La discusión anterior se extiende inmediatamente de una vía, como hemos supuesto, a una ruta OD o al conjunto de la zona de estudio, si se aplica una misma intervención en toda ella.
- Cuando se aplican distintas intervenciones en distintas áreas (por ejemplo, dotar de un autobús adicional a la ruta OD₁, aumentar la capacidad revirtiendo un carril en la ruta OD₂; restringiendo el tráfico en la zona norte) el análisis se extiende de forma sencilla.
- Finalmente, cuando se aplica más de una medida simultáneamente, se pueden aplicar las reglas anteriores, aunque debe tenerse cuidado en los valores efectivos de s y ρ , que pueden verse modificados. En este sentido, recordemos que tales factores se han supuesto fijos. Para ello podemos consultar a expertos sobre su efectividad. Podríamos haber empleado una distribución sobre la misma, pero esto incluiría complejidad adicional, ralentizando los cálculos para el tipo de aplicaciones de intervención rápida que consideramos.

4.4. Medidas de evaluación

El único elemento que nos falta especificar para el modelo de simulación-optimización es la función g (o h) de evaluación de las intervenciones. Esencialmente, debería incluir

- Los costes (económicos, políticos, ambientales,...) asociados a introducir la intervención λ . Por ejemplo, implantar λ_1 puede conllevar un coste de señalización o de desplazamiento de personal que vigile la correcta implantación de la medida; λ_2 , conlleva costes de amortización del vehículo y de combustible, aunque conlleva ingresos por venta de billetes y requeriría un sistema de alertas por SMS, para advertir de la mayor afluencia de autobuses; λ_3 , conlleva costes de control y costes políticos, por la posible impopularidad de las medidas.

- Los beneficios asociados a la reducción de la saturación y mejora de la fluidez del tráfico, que pueden evaluarse en tiempo ganado o reducción de emisiones, entre otros factores.

Claramente, la función de evaluación variará de unos problemas a otros. No es nuestro objetivo aquí hacer una discusión detallada de la construcción de la misma. Para nuestro propósito utilizaremos como medida de evaluación de una intervención la máxima probabilidad de saturación en las rutas OD definidas. Así, si Z_i^λ designa al tráfico en la ruta OD i -ésima, $i=1, \dots, c$ y δ_i^λ designa la capacidad del arco de mínima capacidad en tal la ruta, definiremos la probabilidad de saturación en la ruta i -ésima cuando la intervención es λ a

$$p_i^\lambda = Pr(Z_i^\lambda \geq 0.7 \delta_i^\lambda | \lambda), i = 1, \dots, c,$$

y la máxima saturación, bajo la intervención λ , a

$$h(\lambda) = \max_{i \in \{1, \dots, c\}} p_i^\lambda.$$

Nuestro objetivo será, entonces, resolver

$$\min_{\lambda \in \Lambda} h(\lambda).$$

Observemos que, dado λ , la función $h(\lambda)$ es fácilmente estimable a partir de la salida $\{Z_i^\lambda\}$ del modelo de simulación de flujos descrito anteriormente.

4.5. Caso

En esta sección aplicamos el modelo propuesto para mostrar la utilidad de las ideas anteriores. En primer lugar, presentamos las intervenciones adecuadas dados los problemas encontrados en las rutas OD de la Tabla 3.7 en el Capítulo 3.

Aplicando los métodos a una parte de la ciudad de Ambato a distintas horas, según se muestra en la Figura 3.21, hemos encontrado los siguientes puntos de conflicto en nuestro caso de estudio:

Alta Probabilidad de congestión:

1. En la Av. González Suárez entre los nodos 2, 4 y 5, en las tres bandas horarias.
2. En la Av. Unidad Nacional, entre los nodos 14, 15, 16, 17 y 18, en ambos sentidos y en las tres bandas horarias.
3. En la calle Bolívar, en la zona comprendida entre los nodos 18, 30, 39, 40, 48, 49, 54, 56, 68, 69, 81, 82, 89, 90, 97 y 98 en casi todas sus intersecciones en las diferentes bandas horarias.
4. En la calle Darquea, entre los nodos 16, 32 y 37, en la mañana; entre los nodos 42, 46 y 51, en el horario del mediodía; y entre los nodos 72 y 78 en las tres bandas horarias.
5. En la calle 1ra Imprenta, entre los nodos 55 y 50, en horario de tarde y noche.
6. En la calle Ayllón, en el tramo comprendido entre los nodos 40, 41 y 42, en el horario de mediodía.
7. En la calle Maldonado, entre los nodos 52 y 53, en las tres bandas horarias.
8. En la Av. 12 de Noviembre, especialmente entre los nodos 44, 53, 60 y 61, en las diferentes bandas horarias.
9. En la Av. Cevallos, entre los nodos 15, 33 y 36; los nodos 52, 59, 63, 64, 73, 77, 84, 87, 92, y 95 en las tres bandas horarias en ambos sentidos.
10. En la calle Juan B. Vela, 60, 62 y 74, en las tres bandas horarias.
11. En la calle Espejo, entre los nodos 75, 74, 73, 71, 70, especialmente al mediodía.
12. En la calle Martínez, entre los nodos 87, 88, 89, en las tres bandas horarias.
13. En la calle Mera, entre los nodos 90, 91, 92, especialmente al mediodía y tarde y noche.
14. En la calle Montalvo, entre los nodos 95, 96, en los diferentes horarios.

Adicionalmente, los puntos calientes detectados en la red de estudio, como se observa en la Figura 3.21 con los nodos en color amarillo, sugiere que en la mayoría de sus intersecciones tienden a tener un alto índice de tráfico.

El siguiente cuadro describe de manera resumida los puntos conflictivos detectados, que forman parte de las rutas OD de la Tabla 3.7 que afectarían a tales puntos conflictivos, junto con el tipo de intervención que consideramos más adecuada en cada caso, que limitaremos a las de tipo λ_1 y λ_2 . Por ejemplo, el punto caliente 73 (Av. Cevallos y calle Espejo), viene afectado por la ruta OD 73-7, con ruta más corta 73-64-63-59-52-45-43-36-33-15-103-10-9-8-7. En ella resulta más apropiado aumentar la frecuencia de autobuses (de hecho, resulta imposible añadir a un carril).

Ruta	Carril Adicional λ_1	Transporte Público λ_2
1	4-5-7-29-18-30-39-40-41-42-46-51-58	
2		4-2-102-10-103-15-33-36-43-45-52
3	5-7-29-18-30-39-40-41-42-46-51-58-59	
4		5-7-8-9-10-103-15-33-36-43-45-52-53-60
5		63-59-52-53-44-35-34-14-12-1-2
6		64-63-59-52-53-44-35-34-14-12-1-2
7		73-64-63-59-52-53-44-35-34-14-12-1-2
8		73-64-63-59-52-45-43-36-33-15-103-10-9-8-7

Tabla 4.1. Alternativas de solución a los problemas encontrados

Además, consideramos λ_3 el uso de restricciones a vehículos impares y pares, en días alternos de forma global.

Para ilustrar el uso de restricciones y simplificar la búsqueda, supondremos, en principio, que a lo sumo realizamos una sola intervención. En nuestro caso, según la Tabla 4.1 tenemos 2 intervenciones de carril adicional, 6 de incremento de transporte público y, finalmente, 1 de restricción de tráfico que designaremos, respectivamente, $\{\lambda_1^1, \lambda_1^3, \lambda_2^2, \lambda_2^4, \dots, \lambda_2^8, \lambda_3\}$. Por tanto, el problema a considerar es:

$$\min_{\lambda \in \{\lambda_1^1, \lambda_1^3, \lambda_2^2, \lambda_2^4, \dots, \lambda_2^8, \lambda_3\}} h(\lambda)$$

Como el número de intervenciones es pequeño y no hace falta repetir, de hecho, las simulaciones, procedemos a evaluar el impacto de todas las intervenciones.

La Tabla 4.2 muestra las probabilidades de saturación de las distintas rutas en función de las actuaciones introducidas⁴

		Probabilidades de Saturación según intervención								
OD	Saturación Original	λ_1^1	λ_1^3	λ_2^2	λ_2^4	λ_2^5	λ_2^6	λ_2^7	λ_2^8	λ_3
X ₁	0,9785	0,4400	0,9785	0,9785	0,9785	0,9785	0,9785	0,9785	0,9785	0,0882
X ₂	0,6386	0,6386	0,6386	0,0030	0,6386	0,6386	0,6386	0,6386	0,6386	0,0000
X ₃	0,9883	0,9883	0,4960	0,9883	0,9883	0,9883	0,9883	0,9883	0,9883	0,0224
X ₄	0,0852	0,0852	0,0852	0,0852	0,0000	0,0852	0,0852	0,0852	0,0852	0,0001
X ₅	0,9723	0,9723	0,9723	0,9723	0,9723	0,7700	0,9723	0,9723	0,9723	0,3010
X ₆	0,9906	0,9906	0,9906	0,9906	0,9906	0,9906	0,9313	0,9906	0,9906	0,8852
X ₇	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9280	0,9964	0,4510
X ₈	0,9164	0,9164	0,9164	0,9164	0,9164	0,9164	0,9164	0,9164	0,0145	0,0016
$h(\lambda)$	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9964	0,9906	0,9964	0,8852

Tabla 4.2. Probabilidades de saturación de las rutas en función de las intervenciones

En consecuencia, queda claro que la mejor intervención única es λ_3 , con lo que $h(\lambda)$ tiene una probabilidad de saturación de 0,8852.

		Saturación con intervención adicional							
OD	Saturación con λ_3	λ_1^1	λ_1^3	λ_2^2	λ_2^4	λ_2^5	λ_2^6	λ_2^7	λ_2^8
X ₁	0,0882	0,0667	0,0882	0,0049	0,0882	0,0882	0,0882	0,0882	0,0882
X ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
X ₃	0,0224	0,0224	0,0192	0,0224	0,0224	0,0224	0,0224	0,0224	0,0224
X ₄	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
X ₅	0,3010	0,3010	0,3010	0,3010	0,3010	0,2798	0,3010	0,3010	0,3010
X ₆	0,8852	0,8852	0,8852	0,8852	0,8852	0,8852	0,2656	0,8852	0,8852
X ₇	0,4510	0,4510	0,4510	0,4510	0,4510	0,4510	0,4510	0,3503	0,4510
X ₈	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0000
$h(\lambda)$	0,8852	0,8852	0,8852	0,8852	0,8852	0,8852	0,4510	0,8852	0,8852

Tabla 4.3. Probabilidades de saturación de las rutas en función de las intervenciones

⁴ Para la simulación hemos supuesto que $\rho = 1/2$ y $s = 40$. Los resultados expuestos parecen robustos frente a ligeros cambios a tales parámetros.

Una vez introducida esta intervención, si esa probabilidad de saturación se considerase alta, podemos considerar la posibilidad de introducir una intervención adicional. Los resultados se recogen en la Tabla 4.3.

Ahora, la mejor intervención es λ_2^6 , al implantarla, la probabilidad $h(\lambda)$ máxima de saturación es 0.451.

El proceso continuaría en forma análoga. Obsérvese que en la siguiente iteración deberíamos actuar sobre la ruta OD séptima que es en la que se alcanza la probabilidad máxima antes mencionada de 0.451.

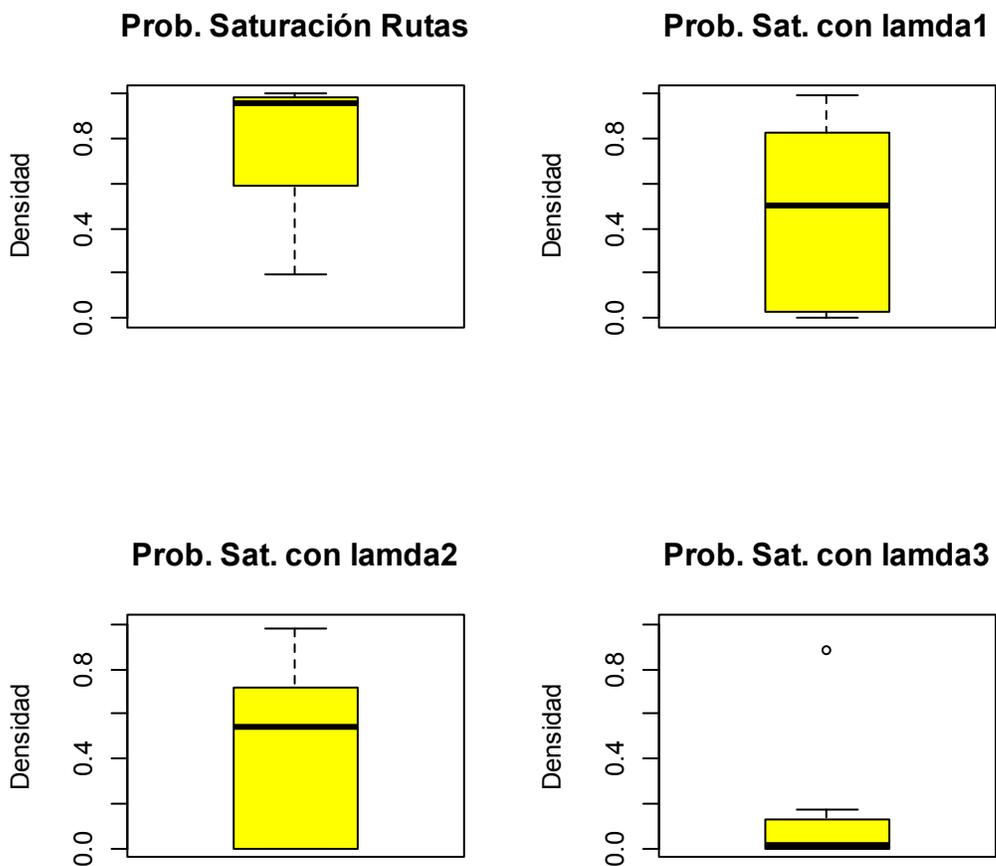


Figura 4.1. Probabilidad de saturación en las rutas OD

La Figura 4.1 muestra los boxplots con las probabilidades de saturación en las rutas OD de la Tabla 3.7. El primer cuadro corresponde a las probabilidades según el comportamiento actual de los flujos vehiculares e indica claramente que la mediana tiene

un valor cercano a 1. El segundo cuadro muestra las probabilidades después de aplicar la intervención λ_1 , incremento de carriles en los tramos donde es posible hacerlo. Como se puede observar, la mediana en esta ocasión tiene un valor aproximado a 0.5, indicando que la probabilidad de saturación en las rutas ha disminuido. De la misma manera, ocurre en el tercer cuadro al aplicar la intervención λ_2 , incremento de frecuencias por las rutas analizadas. Se podría decir que la primera y segunda intervenciones tienen un efecto similar en el flujo vehicular de las rutas OD. Finalmente, el último cuadro indica la probabilidad de comportamiento al aplicar la intervención λ_3 donde se indica que restringir cierta cantidad de vehículos según el número de placa reduciría sustancialmente las probabilidades de saturación en casi todas las rutas analizadas. Sin embargo esta medida no podría, tal vez, ejecutarse permanentemente debido al impacto económico que tendrían los sectores afectados por esta intervención.

A partir de estos resultados, decidimos que, teniendo en cuenta los criterios elegidos, la mejor intervención es λ_3 y la siguiente mejor alternativa es incrementar frecuencias de transporte público (λ_2) en las rutas 6 y 7, ya que se promovería que más usuarios evitasen usar el vehículo propio para movilizarse en los autobuses.

4.6. Conclusiones

A partir del modelo de predicción proporcionado por los MDLs en los puntos de medición de tráfico, se introdujo el concepto de matrices OD dinámicas, para predecir flujos en las rutas principales en la ciudad. Con su acoplamiento, se ha logrado diseñar un modelo de simulación-optimización para poder experimentar en forma rápida distintas intervenciones de mejora del flujo vehicular y encontrar las más adecuadas. El modelo creado es bastante flexible, permitiendo aplicar una o más intervenciones en las zonas en donde se presentan problemas de tráfico.

Hemos descrito así un modelo de simulación – optimización que permite identificar las mejores intervenciones a corto plazo y lo hemos aplicado en nuestro problema en la

ciudad de Ambato para, de esta manera, mejorar los flujos vehiculares especialmente en las zonas detectadas con alta probabilidad de saturación en el Capítulo 3.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y TEMAS FUTUROS

5.1. Resumen

Este trabajo ha mostrado cómo puede apoyarse la toma de decisiones que afecten a la ciudad a través de una buena planificación vial. Esto se realiza dando alternativas posibles de solución mediante un modelo de simulación-optimización de tráfico, primeramente identificando las zonas de mayor conflicto en los flujos vehiculares y determinando las intersecciones de mayor influencia dentro de la red vial. Una vez identificadas, podemos aplicar diversos tipos de intervenciones y, con la ayuda del modelo de simulación, determinar cuál de esas intervenciones propuestas es la que mejores resultados aporta. Una vez aplicados reduciría costes en tiempo, combustible, contaminación, etc.

En el primer capítulo se ha expuesto la situación actual de Ambato, y los motivos por los que el tráfico de la ciudad se ha complicado, con el propósito de definir una zona adecuada de estudio y plantear objetivos específicos que ayuden a afrontar los problemas encontrados en la zona elegida. Con el fin de cumplir con los objetivos indicados en el primer capítulo, se realizó un diagnóstico de la situación actual del tráfico en la ciudad de Ambato, detectando y ubicando las zonas de mayor conflicto, las causas por las que se produce este fenómeno y los planes de acción propuestos o ejecutados hasta el momento para solucionar tales problemas. De igual manera, se presentan diferentes tipos de modelos matemáticos existentes que se han aplicado en situaciones similares, a partir de los cuales se planteó una alternativa diferente para tratar el tráfico en los siguientes capítulos.

En el segundo capítulo se introdujeron métodos que permitieron analizar desde diversas perspectivas algunos de los datos obtenidos en el estudio, centrándonos en una de las

zonas más conflictivas de tráfico en Ambato. Para ello, se tomó una pequeña zona del área total de la ciudad. En los datos conseguidos del área seleccionada, se utilizaron métodos que permiten depurar e imputar valores de los flujos vehiculares de cada arco con el fin de mejorar la consistencia de los datos iniciales. Además, se aportaron metodologías aplicando distintos modelos matemáticos como los MDLs, que permiten predecir a corto plazo volúmenes de tráfico y saturación a partir de datos anteriores. También se introdujeron los flujos OD dinámicos para predecir flujos vehiculares y la eventual saturación en las rutas OD principales en el área de interés. Así se logró determinar las probabilidades de saturación en los principales arcos dentro de la red ejemplo. De igual manera, se aplicó ACP para determinar los puntos calientes dentro de la red y, en conjunto con los métodos mencionados anteriormente, diagnosticar en detalle los sectores donde se presentan problemas respecto del tráfico dentro de la red elegida y, de esta manera, tomar decisiones, de ser posible, antes de que éstos ocurran. En términos generales, en el capítulo se propuso e introdujo el empleo de una serie de métodos relevantes para la predicción y gestión del tráfico, aplicados a una red reducida.

En el tercer capítulo se expandió el estudio de esa zona, con el fin de aplicar los métodos utilizados en el segundo capítulo en la red ejemplo. Aquí, el objetivo fue estudiar la escalabilidad de los métodos propuestos en el capítulo anterior, verificando cómo se pueden aplicar en problemas de tamaño realista. Así, en primer lugar, se determinaron los flujos vehiculares en los arcos donde no existe información, aplicando los métodos de imputación basados en los datos existentes en otros arcos, con la ayuda del modelo beta-binomial y ecuaciones de flujo empleado en el segundo capítulo. No siempre se consiguió la imputación. En los casos en los que no fue así se podrían emplear juicios de expertos. Después, con el fin de facilitar la interpretación del análisis de componentes principales, la red de estudio se subdividió en cinco partes, para determinar los puntos calientes dentro de la misma. A continuación, se aplicaron los MDL, para determinar los posibles flujos en los siguientes períodos de tiempo y la probabilidad de saturación que pueda existir en cada uno de los arcos en los que hay mediciones. De esta forma, se identificaron en detalle

los lugares donde se debe actuar para mejorar el tráfico en las diferentes bandas horarias como se pudo observar en la Figura 3.21. Finalmente, se aplicó el método utilizado para determinar predicciones de flujos OD dinámicos, que permitió identificar las rutas OD donde realizar intervenciones, con el fin de mejorar el flujo vehicular y evitar posibles saturaciones.

Así pues, en los capítulos 2 y 3 se combinan varios métodos para estimar, predecir y determinar problemas a corto plazo en la gestión de tráfico. Esto nos permite identificar zonas donde se debe actuar para mejorar la situación del tráfico en una ciudad, tanto local como globalmente, y estar alerta frente a tales situaciones previsibles. En conjunto, conseguimos un diagnóstico detallado de los problemas de tráfico.

En el cuarto capítulo, una vez detectados los problemas existentes dentro de la red de estudio, se plantearon diferentes alternativas de solución en los puntos, arcos y rutas conflictivas. Estas alternativas han sido evaluadas mediante un modelo de simulación generado para este fin, y de esta manera identificar las mejores alternativas para intervenir en el flujo vehicular de la zona. El modelo de simulación parte de los métodos aplicados en los capítulos anteriores, creando una nueva herramienta de ayuda en la toma de decisiones respecto del tráfico, bastante flexible, pudiéndose aplicar en otras ciudades sin inconvenientes.

Se han cumplido así los objetivos de presentar posibles soluciones a los problemas de tráfico en el área de estudio.

5.2. Algunos problemas abiertos

Como se ha visto, las matrices OD muestran el nivel de demanda vehicular entre los pares OD. Por lo tanto, permiten realizar un seguimiento del comportamiento de la demanda en la red, ayudando en la toma de decisiones en aspectos relacionados con la planificación, administración y evaluación del tráfico en el área de estudio. Inicialmente, se buscaba una matriz OD estacionaria que permitiese interpretar el comportamiento del flujo vehicular

a cierta hora. Sin embargo, para la toma de decisiones, no basta con una matriz OD que represente el comportamiento promedio, por lo que surge la necesidad de generar matrices OD dinámicas. Estas van incorporando información a priori, permitiendo mejorar la predicción de flujos en tiempo real. La combinación de los métodos propuestos permiten realizar esta tarea, por lo que, sería interesante aplicar el mismo principio de las matrices OD dinámicas con otros modelos de predicción de flujo diferentes de los utilizados en esta investigación. Así se podrían comparar los resultados entre sí.

Otra cuestión de interés es añadir incertidumbre al modelo OD sobre las ponderaciones β 's y otros parámetros utilizados en el mismo modificando convenientemente el algoritmo de Gibbs del Capítulo 2. Con el fin de desplazarse desde un origen hacia un destino determinado, los conductores pueden tomar diferentes rutas, en los casos de los Capítulos 2 y 3 se trató el problema de asignación de tráfico asumiendo una misma ponderación para las diferentes alternativas de ruta de un par OD. Sin embargo, existen factores que generan incertidumbre y alterarían la decisión del usuario y, por lo tanto, determinarían una preferencia por cierta ruta de todas las posibilidades existentes.

El modelo de simulación – optimización se ilustró con una función objetivo muy sencilla, referida a la máxima probabilidad de saturación, no teniendo en cuenta aspectos de tipo económico ni de interacción entre las rutas. Podrían explorarse otras funciones como el tiempo medio empleado de viaje por las rutas OD principales por los usuarios, el coste asociado a esos tiempos u otras. Como hemos indicado, se trataría de construir una función de utilidad adecuada y después aproximar por Montecarlo las utilidades esperadas.

Sería importante también realizar un estudio para lograr convenios con instituciones que ayuden a crear un entorno computacional para la toma de decisiones en tiempo real, aplicándose, por ejemplo, en sistemas GPS donde la información se muestra prácticamente de inmediato y añadiendo factores, cambios o alteraciones que van surgiendo con el transcurso del tiempo. El objetivo principal consistiría en utilizar la

información histórica disponible combinándola con datos que vayan surgiendo en el momento y proporcionando tal información al usuario.

Si bien es cierto que se ha trabajado con datos de uno de los sectores más conflictivos respecto del tráfico en Ambato como prueba piloto, sería de gran importancia lograr la implantación de los modelos propuestos en toda la ciudad. Para ello se debería realizar la toma de datos del resto de sectores de la ciudad para someterlo a los estudios, análisis, depuración e imputación de datos. El propósito inicial sería determinar los puntos calientes mediante ACP, con el fin de colocar dispositivos de conteo en lugares estratégicos que ayuden a obtener una base de datos mucho más extensa y, de esta manera, mejorar la predicción en los flujos vehiculares, las probabilidades de saturación y, por ende, en las posibles soluciones a los problemas que se presenten.

Finalmente se podría implantar de manera similar al modelo propuesto en otras áreas metropolitanas de Ecuador.

BIBLIOGRAFIA

Acevedo, J., 2011. *Estudio de Ingeniería de Tránsito para la SemafORIZACIÓN Centralizada en el Casco Urbano de la Ciudad de Ambato*, Ambato: Ilustre Municipio de Ambato - UMTA.

Akcelik, R., 1981. *Analysis, Traffic Signals: Capacity and Timing*. Australian Road Research Board. Vermont South, Victoria 3133 : ARRB Group Limited.

Banks, J., 1998. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. Atlanta, Georgia: EMP Books.

Barceló, J., 2010. *Fundamentals of Traffic Simulation*. California: Springer.

Beckman y Mc. Guire, M., 1956. *Studies in the Economics of the Transportation*. Yale, Univ. Press, New Haven, CT.

Bierlaire, M., 2002. The Total Demand Scale: A New Measure of Quality for Static and Dynamic Origin–Destination Trip Tables. *Transportation Research, Part B36*, pp. 837-850.

Cardozo, O., Bonfanti, F. y Parras, A., 2006. *Los Sistemas de Información Geográfica y la Planificación del Transporte Público. Aplicaciones en la ciudad de Resistencia (Chaco-Argentina)* , Resistencia - Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2006.

Cascetta, E., 1984. Estimation of Trip Matrices from Traffic Counts and Survey Data: A Generalized Least Squares Estimator. *Transportation Research, 18B*, pp. 289-299.

Cascetta, E. y Nguyen, S., 1988. A Unified Framework for Estimating or Updating Origin/Destination Matrices from Traffic Counts. *Transportation Research, 22B*, pp. 437-455.

Castillo, E.; Conejo, A., Pedregal, P., García, R. y Alguacil, N., 2002. *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. México DF: Alfaomega Grupo Editor.

Castillo, E., Gallego, I., Menéndez, J. M. y Jiménez, P., 2011. Link flow estimation in traffic networks on the basis of link flow observations. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 15(4), pp. 205-222.

Castillo, E., Menéndez, J. y Sánchez-Cambronero, S., 2008. Traffic Estimation and Optimal Counting Location Without Path Enumeration Using Bayesian Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Issue 23, p. 189–207.

Daganzo, C. y Sheffi, Y., 1977. On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*, Volumen 11, p. 253–274.

Doblas, J. y Benitez, F., 2005. An Approach for Estimating and Updating Origin-Destination Matrices Based on Traffic Counts Preserving Prior Structure. *Transportation Research, Part 39B*, p. 565–591.

Fernandez, R. y Valenzuela, E., 2004. Gestión Ambiental de Tránsito: Cómo la Ingeniería de Transporte. *Eure*(Vol. XXIX, N°89), pp. 97-107.

French, S. y Ríos Insua, D., 2000. *Statistical decision theory*. New York: Oxford University Press Inc..

Hair, J., Anderson, R. y Tatham, R., 1987. *Multivariate Data Analysis*. New York: Macmillan Pub. Co.

Hazelton, M., 2000. Estimation of Origin-Destination Matrices from Link Flows on Uncongested Networks. *Transportation Research*, 34B, pp. 549-566.

Hazelton, M., 2003. Some Comments on Origin-Destination Matrix Estimation. *Transportation Research*, 37A, pp. 811-822.

Head, K. L., 1995. Event-based Short-term Traffic Flow Prediction Model. *Transportation Research Record*, pp. 46-52.

Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V. y Treiber, M., 2001. MASTER: macroscopic traffic simulation based on a gas-kinetic, non-local traffic model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(2), pp. 183-211.

Herderson, S. G. y Nelson, B. L., 2006. Stochastic Computer Simulation. En: S. G. Herderson y B. L. Nelson, edits. *Handbooks in Operations Research and Management Science: Simulation*. Amsterdam: Elsevier.

IHT, 1997. *Transport in The Urban Environment*. London: The Institution of Highway and Transportation.

Ilustre Municipio de Ambato, 2009. *Plan de Ordenamiento Territorial Ambato 2020*. Quito(Tungurahua): s.n.

Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos - INEC, 2010. <http://www.inec.gob.ec/>.

[En línea] Available at:

http://www.inec.gob.ec/cpv/?TB_iframe=true&height=450&width=800%20rel=slbox

[Último acceso: 12 Marzo 2012].

Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H. y Wright, P. E., 1998. Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*, 9(1), pp. 112-147.

Lee, S. y Fambro, D. B., 1999. Application of Subset Autoregressive Integrated Moving Average Model for Short-Term Freeway Traffic Volume Forecasting. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 179-188.

Levinson, D., 2003. The value of advanced traveler information systems for route choice. En: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Minneapolis: Elsevier, p. 75–87.

Mabry, S. y Gaudiot, J., 1994. Distributed parallel object-oriented environment for traffic simulation (POETS). *Simulation Conference Proceedings, 1994. Winter - IEEE*, pp. 1093 - 1100.

Maher, M. J. y Zhang, X., 1999. *Algorithms for the Solution of the Congested Trip Matrix Estimation Problem. Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Jerusalem, Israel: s.n.

Maher, M. J., Zhang, X. y Vliet, D. V., 2001. A bi-level Programming Approach for Trip Matrix Estimation and Traffic Control Problems with Stochastic User Equilibrium Link Flows. *Transportation Research, Part 35B*, Volumen 35, p. 23–40.

Manivannan, M., 1998. Simulation of Logistics and Transportation Systems. En: J. Banks, ed. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. Hoboken, NJ, USA.: John Wiley y Sons, Inc., pp. 571-604, Ch16.

National Research Council, 2000. *Highway Capacity Manual (HCM2000) - Transportation Research Board*, Washington: National Academy of Sciences.

Nel-lo, O., 1998. Los confines de la ciudad sin confines. Estructura urbana y límites administrativos en la ciudad difusa. En: J. Monclús, ed. *La ciudad dispersa. Suburbanización y nuevas periferias*. Barcelona: Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona, pp. 35-57.

Odoni, A., M., R. J. y N., W., 1994. *Models in Urban Transportation. In Operations Research in the Public Sector*. Amsterdam, Holanda: S. M. Pollock and M. H. Rothkopf and A. Barnett.

- Okutani, I. y Stephanedes, Y. J., 1984. Dynamic Prediction of Traffic Volume Through Kalman Filtering Theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, pp. 1-11.
- Petris, G., Petrone, S. y Campagnoli, P., 2009. *Dynamic Linear Models with R*. s.l.:Springer.
- Ríos Insua, D., Rios Insua, S., Martín, J. y Jiménez, A., 2008. *Simulación. Métodos y aplicaciones*. 2 ed. s.l.:RA-MA S.A. Editorial y Publicaciones.
- Smeed, R. y Bennett, G., 1949. Research on Road Safety and Traffic Flow. *Institute of Civil Engineers - Road Paper*, Issue 29.
- Solórzano, P., 2008. *Estudio del Tráfico Vehicular de la Ciudad de Ambato*, Quito: s.n.
- Sun, S., Zhang, C. y Y., G., 2006. A Bayesian Network Approach to Traffic Flow Forecasting. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1(1), pp. 124-132.
- Taha, H. A., 2004. *Investigación de Operaciones*. México: Pearson Educación.
- Tebaldi, C. y West, M., 1998. Bayesian Inference on Network Traffic Using Link Count Data. *Journal of the American Statistical Association*, pp. 557-573.
- Vardi, Y., 1996. Network Tomography: Estimating Source-Destination Traffic Intensities from Link Data. *Journal of the American Statistical Association*, 91(433), pp. 365-377.
- Voort, M. V. D., Dougherty, M. y Watson, S., 1996. Combining kohonen maps with arima time series models to forecast traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volumen 4, pp. 307-318.
- Wardrop, J. G., 1952. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II*, pp. 78-325.
- West, M. y Harrison, J., 2005. *Bayesian Forecasting and Dynamic Models*. s.l.:Springer.

Williams, B. M. y Hoel, L. A., 1999. *Modeling and Forecasting Vehicular Traffic Flow as a Seasonal ARIMA Process: Theoretical Basis and Empirical Results*, Charlottesville: Ph.D. Dissertation, Dept. Civil Eng., University of Virginia.

Willumsen, L., 1978. *Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts – A Review*, s.l.: Institute of Transport Studies, University of Leeds.

Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y. y Asakura, Y., 1992. Estimation of Origin-Destination Matrices from Link Traffic Counts on Congested Networks.. *Transportation Research, Part B 26(6)*, p. 417–434.

Yu, G. Q. y otros, 2003. Short-term Traffic Flow Forecasting Based on Markov Chain Model. *Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings IEEE*, pp. 208-212.

ANEXOS

Anexo 1.- Recopilación y Análisis de Información

Formato para recolección de datos de la distribución del volumen de arribos

Distribución del volumen de arribos

LUGAR: AMBATO

CRUCE : 1

GRUPO No: 1

DIRECCIÓN: GONZÁLES SUÁREZ Y 12 DE NOVIEMBRE

NO. CARRILES TEÓRICO: 2

NO. CARRILES EFECTIVO: 2

ANCHO EFECTIVO: 7,0 M

Intervalo	Tipo de vehículo			Vehic Equiv	inter pico	Intervalo	Tipo de vehículo			Vehic Equiv	inter pico	Intervalo	Tipo de vehículo			Vehic Equiv	inter pico	
	A	B	C				A	B	C				A	B	C			
6:30 6:45						12:00 12:15	203	18	3	247		18:00 18:15	168	21	6	225		
6:45 7:00	146	25	4	198		12:15 12:30	186	16	7	236		18:15 18:30	218	18	7	272		
7:00 7:15	163	23	4	223		12:30 12:45	207	15	7	255		18:30 18:45	160	17	2	199		
7:15 7:30	144	23	7	208	629	12:45 13:00	175	20	2	220	957	18:45 19:00	188	22	1	235	930	
7:30 7:45	189	25	10	260	889	13:00 13:15	184	18	7	238	948					0	705	
7:45 8:00	167	18	3	225	915	13:15 13:30	149	17	2	188	900					0	434	
8:00 8:15	182	21	4	228	920	13:30 13:45	169	16	4	211	857					0	235	
8:15 8:30	171	18	6	228	941	13:45 14:00	151	20	9	214	850					0	0	
8:30 8:45	180	27	6	231	912	16:00 16:15	175	25	9	248								
8:45 9:00	188	17	6	237	924	16:15 16:30	182	17	8	236								
						16:30 16:45	167	20	10	232								
						16:45 17:00	211	21	5	266	981							
						17:00 17:15	166	15	5	209	942							
						17:15 17:30	195	19	14	268	974							
						17:30 17:45	180	14	8	228	970							
						17:45 18:00	183	17	6	232	937							
Valor Max. Hora Pico =					941	Valor Max. Hora Pico =					957	981	Valor Max. Hora Pico =					930

OBSERVACIONES GENERALES SOBRE EL AFORO

INTERVALO OBSERVADO							
CLIMA							

01. vehículo varado

07. Comercio ambulante

Reducción de Carriles:

02. accidente

08. Pavimento en mal estado

12. Por parqueo

03. Obras

09. Regula agente de Tránsito

13. Por pavimento en mal estado

04. Paradero

10. Congestión intersección siguiente

14. Por ventas ambulantes

05. Zona de parqueo

11. Congestión intersección anterior

15. No hay demarcación horizontal

06. Grito prohibido a la Izq

16. Otros

Fuente: Formulario tomado del estudio del Plan Maestro de Tráfico de la ciudad de Ambato.

Para el ejemplo, del formulario anterior se pudieron determinar los siguientes datos para cada uno de los puntos de aforo marcados en el mapa.

Intersección: Avenida 12 de Noviembre, Gonzáles Suárez, avenida el Rey, Avenida Las Américas, y calle Juan Cajas.

Tipo de distribuidor de tráfico: Redondel (conocido como redondel de Cumandá),

Medida: Volumen de tráfico de entrada y salida de vehículos.

Fecha: Jueves 10 de febrero del 2011. Grupo de trabajo: 1

N° de carriles 2 N° carriles efectivos 2 Ancho efectivo del carril 7m

Intervalo de tiempo de registro de conteo: 15 minutos.

Horario Diario: 6:30am a 9:00am 12:00pm a 14:00pm 16:00pm a 19:00pm

Clasificación de vehículos por tipo:

A= vehículos livianos 90 % B= buses 9 % C= camiones 1 %

En el formulario en el intervalo 6:45 a 7:00 se registra: A=146 B=21 C= 4

Vehículos equivalentes = $(A + 2B + 2.5C) = (146 + 2(21) + 2.5(4)) = 198$

Intervalo pico

Valor Máximo Hora Pico 6:30 a 9:00 = 941

Valor Máximo Hora Pico 12:00 a 14:00 = 957

Valor Máximo Hora Pico 16:00 a 19:00 = 981

En el Plan Maestro de Tráfico de la ciudad de Ambato, también se encontraron tablas en donde muestran los recorridos realizados por las calles que conforman el casco urbano de la ciudad, con el fin de registrar los tiempos de viaje a través de las mismas, planificándose según muestra la tabla siguiente:

CORREDORES	DESDE	HASTA	SENTIDO
Doce de Noviembre	González Suárez	Eugenio Espejo	N-S Y S-N
Pedro Fermín Cevallos	Francisco Flor	Unidad Nacional	N-S Y S-N
Antonio José de Sucre	Quito	Eugenio Espejo	S-N
Simón Bolívar	Unidad Nacional	Francisco Flor	N-S
Eugenio Espejo	12 de Noviembre	Lizardo Ruiz	E-O
Joaquín Lalama	Cuenca	J. B. Vela	O-E
Luis A. Martínez	J. B. Vela	Rocafuerte	E-O
Juan León Mera	Bolívar	J. B. Vela	O-E
Juan Montalvo	J. B. Vela	Lizardo Ruiz	E-O
Mariano Castillo	Rocafuerte	J. B. Vela	O-E

Tabla 1. Corredores Evaluados

Fuente: Plan Maestro de Tráfico de la ciudad de Ambato (Acevedo, 2011)

El método de velocidad de recorrido para la recolección de los datos de tiempos y velocidades de recorrido fue el denominado del “vehículo flotante” (Acevedo, 2011). Al respecto, se realizaron mediciones en los corredores viales, del casco central urbano. Esta incluye la repetición de los recorridos en períodos de máxima demanda y en períodos de “flujo libre”.

Según el informe del Plan Maestro de Tráfico de la ciudad de Ambato del GAD-MA se obtuvieron los siguientes datos sobre el comportamiento de los recorridos a través de los diferentes corredores del casco urbano según se muestra en la Tabla 2:

Corredor	Desde	Hasta	Velocidad de Operación (km/h)				
			Mañana	Mediodía	Tarde	Sábado	Domingo
12 de Noviembre	González Suárez	Juan León Mera	16	13	8	14	18
Mariano Castillo	Simón Bolívar	Juan Benigno Vela	7	6	3	7	13
Cevallos	Francisco Flor	Unidad Nacional	18	12	11	15	19
Eugenio Espejo	12 de Noviembre	Lizardo Ruiz	8	11	6	7	10
Juan León Mera	Simón Bolívar	Juan Benigno Vela	5	4	3	24	19
Juan Montalvo	Juan Benigno Vela	Lizardo Ruiz	7	6	5	9	20
Joaquín Lalama	Cuenca	Cevallos	9	12	5	8	16
Luis A. Martínez	Juan Benigno Vela	Rocafuerte	8	10	4	13	12
Simón Bolívar	Unidad Nacional	Quito	12	5	6	10	17
Sucre	Quito	Espejo	8	7	6	15	12
Velocidad Media Recorrido Corredores Casco Central			9,8	8,6	5,7	12,2	15,6

Tabla 2. Velocidades medidas en los Corredores Evaluados

Fuente: Plan Maestro de Tráfico de la ciudad de Ambato. (Acevedo, 2011)

Anexo 2.- Tablas de datos empleados en el desarrollo de la tesis

			ARCOS									
INTERVALO			61-75	75-61	75-74	74-75	62-74	74-73	73-63	64-73	63-64	62-63
Mañana	6:30	6:45	0	116	116	0	0	73	13	0	0	0
	6:45	7:00	202	205	217	35	217	146	119	100	107	23
	7:00	7:15	228	205	215	33	244	149	196	80	84	21
	7:15	7:30	235	227	238	40	262	159	146	120	128	29
	7:30	7:45	201	218	223	56	278	134	130	131	138	37
	7:45	8:00	219	218	226	54	248	139	148	113	130	24
	8:00	8:15	209	197	199	53	268	156	182	121	130	35
	8:15	8:30	197	193	186	48	213	144	158	146	160	39
	8:30	8:45	208	184	184	70	222	143	187	149	168	67
8:45	9:00	214	200	189	53	265	146	158	121	134	44	
Medio Día	12:00	12:15	203	211	192	58	290	232	193	251	277	81
	12:15	12:30	200	200	192	62	248	139	194	183	204	52
	12:30	12:45	198	216	197	57	243	133	162	169	193	61
	12:45	13:00	199	208	201	53	240	172	195	159	181	41
	13:00	13:15	214	197	202	58	238	156	160	138	159	54
	13:15	13:30	230	205	209	53	238	128	178	128	149	48
	13:30	13:45	190	197	186	66	238	163	164	145	156	39
	13:45	14:00	206	212	196	43	198	126	162	125	136	43
Tarde y Noche	16:00	16:15	200	186	188	68	281	134	183	221	246	51
	16:15	16:30	218	216	195	52	313	119	206	147	171	57
	16:30	16:45	197	184	188	60	221	169	212	149	169	67
	16:45	17:00	201	191	192	50	228	150	221	159	183	95
	17:00	17:15	193	194	185	46	196	140	197	158	180	57
	17:15	17:30	194	203	195	43	219	144	171	161	190	49
	17:30	17:45	194	201	186	53	210	155	170	185	215	50
	17:45	18:00	175	198	187	53	233	170	194	146	171	42
	18:00	18:15	218	211	206	39	194	134	163	137	158	57
	18:15	18:30	195	202	197	43	212	174	171	157	175	54
	18:30	18:45	183	230	213	38	154	106	144	155	172	53
18:45	19:00	206	203	214	52	185	112	143	145	168	57	

Tabla 3. Datos correspondientes a cada arco existente en la red ejemplo

Arcos/ horario	56- 68	90- 97	97- 98	99- 96	96- 91	91- 88	88- 83	67- 57	58- 65	65- 72	72- 78	59- 63	63- 59	63- 64	64- 63	64- 73	73- 64	73- 77	77- 73	84- 87	87- 84	87- 92	92- 87	92- 95	95- 92	95- 100	100- 95	98- 99	99- 100	95- 96	96- 97	90- 91	91- 92	87- 88	88- 89	73- 72	72- 71	64- 65	65- 66	56- 57	57- 58	58- 59
6:45	80	70	57	106	83	35	146	92	39	36	43	91	126	107	118	100	118	97	98	117	179	116	126	103	164	116	81	43	147	74	79	86	113	86	125	118	112	7	10	62	21	21
7:00	93	62	59	93	78	39	177	82	46	42	50	73	206	84	196	80	196	84	180	156	215	149	156	121	208	169	98	88	186	74	93	83	107	101	145	120	114	4	8	78	46	49
7:15	118	84	59	108	78	47	136	122	45	42	51	115	162	128	146	120	146	120	126	153	170	140	125	116	163	126	91	80	121	64	57	84	107	87	113	127	118	8	12	95	54	59
7:30	105	58	53	84	70	44	118	90	20	19	28	122	151	138	130	131	130	131	116	140	144	128	108	105	141	105	83	69	120	66	80	75	95	86	92	107	100	7	8	72	32	45
7:45	106	82	66	101	80	49	170	94	25	24	33	121	162	130	148	113	148	111	130	145	208	143	140	119	184	142	92	86	136	74	82	87	110	150	148	112	104	17	18	62	29	42
8:00	108	104	80	126	98	50	172	79	42	39	47	116	202	130	182	121	182	121	164	159	212	153	150	132	195	151	93	88	142	80	92	103	133	144	146	126	118	9	12	76	30	39
8:15	103	109	84	118	95	69	170	82	32	30	36	144	180	160	158	146	158	143	140	179	206	171	136	141	176	146	93	75	161	102	100	104	130	148	148	114	106	14	16	78	43	38
8:30	116	117	96	118	102	76	162	102	53	50	56	145	230	168	186	149	186	144	168	178	199	166	142	141	183	145	94	89	152	71	128	112	139	158	135	114	106	19	22	78	44	41
8:45	104	86	70	76	67	80	154	142	55	51	57	121	170	134	140	121	140	122	140	153	190	146	136	115	181	138	91	77	146	75	89	80	92	137	132	117	111	13	17	75	34	46
12:00	96	109	81	100	83	61	200	142	86	81	91	242	239	276	192	250	192	243	170	256	242	230	188	172	252	193	89	95	172	82	94	91	113	154	158	192	182	26	32	74	96	78
12:15	102	117	89	106	88	86	164	129	112	104	104	192	233	204	194	183	194	177	180	265	202	236	144	178	188	180	93	89	160	78	103	102	121	143	140	114	112	21	29	73	108	94
12:30	94	115	86	104	86	62	180	127	110	102	102	165	195	193	162	169	162	164	149	243	222	218	173	166	230	214	98	79	184	82	98	95	117	197	141	108	108	24	32	67	90	84
12:45	96	88	74	90	78	73	174	140	102	94	98	162	217	181	195	159	195	158	174	228	215	208	152	157	202	204	73	53	159	77	102	90	107	174	148	136	132	22	29	74	88	89
13:00	112	82	69	98	82	77	179	142	72	68	74	133	188	159	160	138	160	137	138	204	217	184	172	144	230	163	110	59	172	77	96	94	112	173	136	121	116	21	25	98	79	78
13:15	98	125	91	118	94	72	165	122	58	54	60	128	204	149	178	128	178	125	168	229	203	204	160	161	210	178	85	92	144	82	96	104	128	140	129	108	103	21	25	95	76	80
13:30	92	92	78	94	81	58	146	112	76	70	76	144	190	156	164	145	164	144	141	186	178	168	138	134	181	177	93	78	140	88	102	89	111	114	113	126	120	11	17	74	86	59
13:45	88	96	82	104	89	68	158	104	46	42	50	122	190	136	162	125	162	124	146	181	194	160	172	132	228	147	93	92	150	80	110	99	121	134	108	99	92	11	14	65	48	74
16:00	106	146	103	88	77	64	189	134	94	87	89	228	216	246	182	220	182	210	160	213	233	197	170	150	228	137	75	76	190	76	100	86	105	136	158	100	100	25	32	88	74	63
16:15	103	104	80	101	83	71	208	146	87	81	84	151	242	171	206	147	206	141	190	202	255	189	198	148	267	180	103	73	178	88	95	94	114	142	165	95	92	24	30	73	90	68
16:30	110	106	85	104	89	71	203	144	104	95	100	145	254	169	212	149	212	149	188	242	247	216	203	166	273	202	87	86	160	72	110	99	121	205	148	130	128	20	28	94	86	79
16:45	116	112	82	114	90	51	178	151	134	122	122	166	298	183	220	159	220	155	202	250	220	224	166	171	220	181	86	97	159	86	90	96	123	168	146	118	118	24	35	90	160	90
17:00	102	224	144	115	95	70	178	156	90	82	86	163	237	180	197	158	197	154	182	225	217	205	157	162	206	156	96	88	156	98	108	105	130	156	146	113	110	22	28	72	92	84
17:15	108	109	90	114	98	41	180	142	90	84	88	172	202	190	170	161	170	158	154	232	222	206	179	164	237	194	99	79	176	70	122	102	133	143	136	114	110	29	35	74	92	92
17:30	102	102	77	98	80	68	154	133	108	100	102	195	200	215	170	185	170	180	158	244	188	218	138	163	182	172	94	88	154	82	87	90	109	156	126	130	128	30	37	70	92	77
17:45	118	126	93	106	88	54	162	97	87	81	88	160	224	171	194	146	194	146	176	207	198	187	152	148	200	206	86	80	144	68	102	95	120	123	128	137	131	25	30	90	50	78
18:00	89	122	86	109	86	66	148	149	93	86	90	136	198	158	163	137	163	135	152	190	182	176	126	141	163	142	99	92	152	81	85	95	117	142	128	111	108	21	28	66	68	86
18:15	100	117	81	94	74	59	154	164	90	83	89	165	214	175	170	157	170	156	152	213	188	192	142	146	188	158	84	87	150	78	75	83	102	170	126	141	135	18	25	67	79	75
18:30	128	96	77	105	86	78	171	148	110	102	99	156	180	172	144	155	144	150	130	201	209	181	168	144	223	142	94	88	162	90	97	98	118	146	128	83	83	17	26	92	115	98
18:45	103	125	96	108	92	56	126	122	91	85	86	142	174	168	143	145	143	140	135	196	154	173	121	141	155	154	84	91	131	63	113	99	126	116	100	95	94	23	29	72	84	90

Tabla 4. Matriz de datos de los arcos de la sección Red 1

Arcos/ Horario	56- 57	57- 58	58- 59	61- 62	62- 63	55- 54	49- 50	50- 51	51- 52	52- 53	45- 46	46- 47	47- 48	40- 41	41- 42	42- 43	44- 43	44- 53	53- 44	53- 60	60- 53	60- 62	60- 61	61- 60	43- 45	45- 43	45- 52	52- 45	52- 59	59- 52	59- 63	63- 59	42- 46	46- 51	51- 58	57- 55	55- 50	50- 47	47- 41	40- 48	48- 49	49- 54	54- 56
6:45	62	21	21	160	23	11	63	62	73	136	25	29	31	51	49	69	46	193	142	320	204	80	240	204	116	71	105	86	77	132	91	126	51	54	43	56	46	43	41	111	103	98	80
7:00	78	46	49	174	21	18	62	64	80	139	42	32	41	68	69	74	57	256	129	366	203	90	276	203	147	112	132	141	95	221	73	206	66	26	57	90	72	82	74	125	116	111	90
7:15	95	54	59	203	29	25	86	88	99	188	33	37	48	72	74	88	59	205	142	356	203	88	268	203	100	93	90	118	74	180	115	162	62	59	56	126	100	90	80	160	148	142	116
7:30	72	32	45	242	37	18	74	74	75	139	36	23	29	39	40	76	32	184	145	296	172	73	223	172	147	86	132	108	94	168	122	151	53	76	25	92	74	59	53	159	147	139	112
7:45	62	29	42	201	24	13	68	68	70	135	37	23	27	20	22	61	36	178	112	288	164	71	217	164	150	94	135	114	95	178	121	162	55	74	26	70	56	46	40	174	158	146	119
8:00	76	30	39	226	34	18	70	71	80	166	39	34	41	32	36	46	43	173	150	306	196	76	230	196	135	110	122	135	89	214	116	202	44	100	45	88	70	69	62	158	146	138	112
8:15	78	43	38	178	39	16	76	76	76	150	44	22	30	47	48	44	46	172	140	292	186	72	220	186	190	100	171	122	118	192	144	180	56	113	26	87	71	64	56	144	133	127	104
8:30	78	44	41	209	66	22	84	85	95	160	52	27	34	56	56	41	48	191	157	318	182	79	239	182	193	127	174	160	123	249	145	230	46	118	49	112	90	64	57	177	163	154	126
8:45	75	34	46	226	44	26	74	76	92	185	38	24	31	46	47	43	48	186	147	334	170	83	251	170	127	95	115	120	87	182	121	170	70	75	60	127	102	58	51	151	139	133	110
12:00	74	96	78	314	80	30	96	98	110	154	68	34	38	82	78	70	61	110	150	232	159	57	174	159	149	135	134	172	194	268	242	239	57	58	61	149	118	55	51	133	124	121	100
12:15	73	108	94	230	52	26	82	84	108	150	54	42	48	88	86	78	54	162	162	282	160	71	210	160	209	133	188	166	134	260	192	233	90	68	80	132	106	74	68	142	132	126	104
12:30	67	90	84	235	61	25	84	88	110	160	47	37	44	103	99	84	57	150	152	280	152	69	212	152	183	117	164	146	121	224	165	195	110	54	88	128	103	68	60	134	124	120	98
12:45	74	88	89	217	41	28	71	75	102	134	48	45	52	125	121	80	55	146	152	250	142	64	187	142	156	125	141	156	105	243	162	217	116	110	90	140	112	75	68	124	118	114	94
13:00	98	79	78	219	54	29	96	100	112	160	38	40	49	105	103	88	65	154	144	283	146	70	213	146	107	110	96	138	80	211	133	188	72	82	63	148	120	86	77	138	130	126	104
13:15	95	76	80	217	48	26	67	70	82	152	40	38	48	88	87	86	68	145	162	266	160	64	202	160	126	117	113	144	84	230	128	204	48	114	48	132	106	82	73	120	113	108	89
13:30	74	86	59	214	38	24	84	86	97	150	42	33	39	64	64	54	34	126	138	244	138	62	183	138	155	108	139	136	103	208	144	190	59	98	56	122	98	58	52	127	118	113	93
13:45	65	48	74	169	43	22	76	78	86	162	38	26	31	44	46	51	27	154	132	284	152	72	213	152	109	106	98	134	76	208	122	190	46	68	46	106	84	56	51	128	118	115	95
16:00	88	74	63	246	51	27	77	81	106	232	60	32	42	54	54	52	52	150	134	336	185	83	253	185	172	120	155	152	182	232	228	216	99	76	85	138	111	78	68	141	132	126	104
16:15	73	90	68	299	57	30	69	74	92	112	52	34	40	72	71	60	50	196	138	285	182	71	214	182	170	138	153	170	110	270	151	242	72	94	64	150	120	73	66	147	138	131	108
16:30	94	86	79	225	66	32	73	78	104	103	49	28	38	74	74	59	44	169	140	253	143	62	191	143	137	145	124	180	95	284	145	254	108	109	88	156	124	74	64	142	132	126	104
16:45	90	160	90	243	95	32	78	84	104	172	58	40	48	71	72	67	52	188	142	324	144	80	244	144	180	167	162	208	118	330	166	298	88	95	78	161	129	82	74	154	146	140	114
17:00	72	92	84	171	57	32	73	78	92	187	50	56	64	86	86	74	66	183	158	334	159	82	252	159	168	132	151	166	109	262	163	237	56	94	56	157	126	94	70	145	137	131	106
17:15	74	92	92	190	49	29	80	84	98	150	48	36	44	78	78	57	44	183	157	304	164	75	229	164	182	120	164	148	118	232	172	202	66	108	62	146	116	78	70	160	148	140	115
17:30	70	92	77	179	50	27	86	89	108	170	56	36	46	75	76	56	46	181	176	317	163	81	236	163	241	120	217	148	152	228	195	200	84	96	76	137	110	92	82	146	136	130	108
17:45	90	50	78	196	42	22	74	76	100	167	52	45	52	81	80	68	54	182	143	317	174	79	238	174	191	134	172	166	123	260	160	224	100	54	84	109	87	72	66	165	155	147	120
18:00	66	68	86	176	57	29	79	83	104	154	46	38	46	98	96	76	70	174	162	298	162	74	223	162	136	120	122	152	94	234	136	198	88	73	74	147	118	80	72	125	117	112	92
18:15	67	79	75	198	54	32	82	88	108	156	46	40	46	76	74	86	62	146	170	272	162	66	206	162	170	124	153	153	113	236	165	214	86	67	74	162	130	71	65	146	136	130	109
18:30	92	115	98	136	52	31	85	89	114	164	46	40	50	75	76	70	58	142	156	274	140	68	205	140	168	114	151	144	113	220	156	180	102	26	84	160	129	85	76	182	168	160	130
18:45	72	84	90	174	57	26	68	72	94	146	42	48	55	68	69	88	34	152	136	268	134	68	201	134	153	110	138	137	101	212	142	174	90	28	73	130	104	82	75	149	139	130	107

Tabla 5. Matriz de datos de los arcos de la sección Red 2

Arcos/ Horario	40-41	41-42	42-43	44-43	36-37	37-38	38-39	34-33	33-32	32-31	31-30	18-17	17-18	16-17	17-16	15-16	16-15	14-15	15-14	14-14	34-14	34-14	34-35	35-34	35-44	44-35	43-36	36-43	36-33	33-36	33-15	15-33	16-32	32-37	37-42	41-38	38-31	31-17	18-30	30-39	39-40
6:45	51	49	69	46	35	64	60	44	32	29	32	131	100	86	157	96	639	109	182	180	145	174	183	206	163	117	47	92	59	88	47	129	132	103	43	47	45	113	145	106	
7:00	68	69	74	57	50	83	81	59	43	37	45	139	68	86	166	95	655	140	128	134	186	118	228	182	184	164	69	134	86	124	70	154	160	127	72	75	67	114	158	110	
7:15	72	74	88	59	53	65	68	84	55	35	44	171	130	107	190	119	784	134	122	130	151	114	219	106	192	152	92	122	115	120	90	74	94	82	78	76	67	122	165	140	
7:30	39	40	76	32	46	63	61	54	40	29	34	115	93	76	133	84	56	110	203	182	139	163	173	196	160	128	84	104	105	98	94	91	102	85	52	54	50	98	132	109	
7:45	20	22	61	36	48	71	64	52	41	32	33	128	111	99	136	109	41	120	173	147	137	134	174	178	151	132	92	102	115	97	106	115	124	101	38	45	44	112	145	74	
8:00	32	36	46	43	48	69	67	40	38	30	36	124	93	73	135	81	43	143	166	154	172	149	207	200	183	144	83	117	104	110	99	108	117	96	59	61	55	120	157	80	
8:15	47	48	44	46	64	79	74	41	44	32	38	126	84	63	134	69	48	132	191	182	164	172	196	212	174	136	144	108	180	100	182	104	116	100	56	60	55	112	150	102	
8:30	56	56	41	48	67	79	75	78	60	38	41	122	127	109	143	120	76	127	124	136	140	122	196	183	170	161	142	130	178	124	164	86	107	95	57	61	58	120	161	122	
8:45	46	47	43	48	46	68	64	56	40	31	35	120	92	75	125	82	35	151	134	134	190	134	190	183	166	132	77	104	96	98	82	108	117	96	50	54	50	116	150	108	
12:00	82	78	70	61	64	78	73	52	48	34	38	132	127	111	141	122	71	134	176	145	148	132	187	202	151	190	99	150	124	141	115	95	110	96	54	59	55	121	159	116	
12:15	88	86	78	54	70	80	78	82	64	40	45	96	110	85	106	94	47	109	174	149	102	132	168	198	153	185	134	148	168	142	151	79	103	93	70	72	66	100	145	163	
12:30	103	99	84	57	60	74	72	98	64	41	44	118	121	100	117	110	57	111	185	168	118	138	186	212	149	172	104	138	130	135	102	83	107	93	64	66	63	123	167	128	
12:45	125	121	80	55	58	74	73	84	54	36	43	123	137	116	124	128	60	107	176	166	101	144	163	171	133	178	82	144	102	136	77	91	109	94	72	72	65	122	165	137	
13:00	105	103	88	65	58	74	75	68	50	35	44	98	132	109	102	120	31	115	195	162	126	146	178	210	144	172	99	138	124	130	107	95	111	95	79	78	68	100	144	142	
13:15	88	87	86	68	62	71	71	72	54	34	42	95	141	121	103	133	54	113	159	178	129	156	180	200	154	178	99	144	124	136	106	73	92	83	74	73	65	89	131	194	
13:30	64	64	54	34	56	72	68	63	48	34	37	92	114	97	106	108	30	97	182	172	116	152	160	193	134	142	111	114	139	108	126	96	111	94	52	56	53	94	131	138	
13:45	44	46	51	27	44	62	60	31	30	25	31	102	111	97	123	108	40	119	191	166	145	157	167	183	148	138	65	110	81	102	76	100	105	87	50	52	47	93	124	126	
16:00	54	54	52	52	62	69	68	21	35	25	35	94	117	98	90	108	38	151	159	154	184	150	200	176	184	162	110	130	138	118	143	75	85	78	68	68	57	102	137	104	
16:15	72	71	60	50	64	72	71	46	46	30	39	124	121	101	126	112	80	127	199	144	150	132	184	180	162	180	106	143	132	134	128	72	88	81	67	68	60	118	157	118	
16:30	74	74	59	44	58	73	71	62	50	34	40	106	130	111	119	123	52	107	253	182	109	158	147	191	131	184	81	146	101	139	87	91	106	92	64	66	60	114	154	126	
16:45	71	72	67	52	70	81	79	68	58	37	45	103	125	101	120	112	55	117	136	104	126	92	182	169	144	215	108	172	135	162	120	87	107	96	74	75	67	107	152	98	
17:00	86	86	74	66	62	74	74	73	53	35	42	116	123	101	129	112	68	130	138	117	149	98	203	172	159	190	92	152	115	143	95	84	102	90	71	72	64	118	160	99	
17:15	78	78	57	44	64	78	76	61	52	35	43	130	111	87	142	97	67	132	203	202	142	188	188	244	155	160	125	126	156	120	147	95	111	97	70	72	65	124	167	132	
17:30	75	76	56	46	80	80	80	68	64	37	47	136	129	103	152	114	123	127	169	142	128	132	187	192	157	158	186	127	232	120	230	51	78	79	82	81	72	122	168	103	
17:45	81	80	68	54	68	77	75	64	56	36	42	140	128	108	149	119	93	125	238	184	152	166	198	222	164	182	126	146	158	136	148	78	98	89	67	69	62	113	155	138	
18:00	98	96	76	70	64	79	78	74	56	38	45	109	152	132	124	146	56	132	198	141	139	122	194	196	155	178	110	142	138	136	121	93	112	98	74	75	67	128	173	138	
18:15	76	74	86	62	59	76	74	54	46	33	40	125	124	104	129	115	49	113	290	232	131	228	180	280	156	180	91	144	114	135	104	102	115	98	66	68	61	125	165	118	
18:30	75	76	70	58	58	74	74	51	44	32	42	139	131	109	145	121	70	112	234	168	132	158	173	218	136	166	98	134	122	123	113	98	111	95	75	75	65	124	166	118	
18:45	68	69	88	34	52	61	64	44	40	27	38	105	112	91	110	101	62	113	177	165	116	157	152	200	128	158	87	127	109	118	102	70	83	74	74	71	61	112	150	136	

Tabla 6. Matriz de datos de la sección Red 3

Horario	18-1	17-1	16-1	17-1	15-1	16-1	14-1	15-1	103-	13-1	11-1	12-1	10-1	11-1	9-10	10-9	8-9	9-8	7-8	8-7	1-2	2-1	2-4	4-2	4-5	5-4	1-12	12-1	12-1	14-1	1-11	2-10	102-	10-1	10-1	103-	103-	15-1	9-13	13-1	17-8	5-7	7-29	29-1
6:45	131	100	86	157	96	639	109	182	1	0	26	4	17	47	10	29	9	26	4	28	158	121	198	123	232	83	90	130	90	128	29	34	28	28	38	70	38	68	4	5	5	148	94	94
7:00	139	68	86	166	95	655	140	128	1	0	53	5	40	74	18	48	16	44	6	46	174	156	247	179	306	107	120	162	119	158	48	39	38	61	54	76	54	76	6	7	10	108	91	91
7:15	171	130	107	190	119	784	134	122	1	0	68	5	54	50	46	35	42	32	16	42	200	131	212	216	229	161	146	158	146	156	47	56	46	50	62	62	62	62	7	8	25	82	86	86
7:30	115	93	76	133	84	56	110	203	1	0	50	4	38	44	26	30	23	26	9	32	168	164	143	240	198	115	100	154	100	150	44	58	24	42	36	52	36	52	5	6	14	106	81	81
7:45	128	111	99	136	109	41	120	173	1	0	74	4	57	63	44	43	40	39	16	48	216	174	216	238	292	134	130	176	128	172	56	56	32	65	53	79	53	79	8	9	24	130	92	92
8:00	124	93	73	135	81	43	143	166	1	0	72	5	56	50	40	38	36	34	14	42	194	160	212	223	331	149	144	188	144	185	54	59	40	65	54	82	54	82	7	8	24	76	105	105
8:15	126	84	63	134	69	48	132	191	2	1	88	3	74	94	46	62	42	56	15	66	164	168	172	212	254	138	124	168	124	164	50	60	52	94	80	118	80	118	10	12	26	94	97	97
8:30	122	127	109	143	120	76	127	124	1	0	68	5	46	72	36	45	33	41	12	48	179	194	186	267	314	182	142	144	142	142	70	52	36	52	56	60	56	60	7	8	20	86	102	102
8:45	120	92	75	125	82	35	151	134	1	0	76	3	57	69	50	45	45	41	18	52	184	172	174	175	264	134	142	182	140	179	58	30	52	54	72	60	72	60	9	10	27	110	100	100
12:00	132	127	111	141	122	71	134	176	2	1	92	6	65	101	54	66	49	60	19	70	184	181	152	248	204	174	151	198	150	194	84	100	86	66	110	66	110	66	12	14	29	114	100	100
12:15	96	110	85	106	94	47	109	174	2	1	91	5	70	62	56	47	50	43	19	54	182	182	138	230	174	126	146	166	144	163	72	73	69	66	84	80	84	80	10	12	32	107	86	86
12:30	118	121	100	117	110	57	111	185	1	1	96	4	74	73	77	46	69	42	28	58	236	167	211	237	284	215	130	156	130	153	73	84	59	51	86	48	86	48	12	13	42	104	106	106
12:45	123	137	116	124	128	60	107	176	2	1	97	4	80	103	78	64	70	58	27	74	206	188	184	246	278	229	142	147	140	144	56	95	56	69	91	66	91	66	14	15	43	80	103	103
13:00	98	132	109	102	120	31	115	195	2	1	102	6	86	80	74	55	68	50	26	66	175	182	192	229	247	209	132	179	130	175	62	74	58	76	86	86	86	86	12	14	42	84	83	83
13:15	95	141	121	103	133	54	113	159	1	1	89	5	75	48	66	36	60	32	24	45	172	137	156	187	210	164	122	121	122	119	45	47	45	67	62	84	62	84	10	11	36	79	70	70
13:30	92	114	97	106	108	30	97	182	2	0	79	3	58	73	38	50	36	45	12	53	164	144	140	203	184	169	98	130	98	127	65	80	53	72	72	86	72	86	8	10	22	86	78	78
13:45	102	111	97	123	108	40	119	191	1	0	58	5	40	56	23	41	21	37	8	42	161	138	144	153	188	166	118	170	117	168	60	53	79	48	85	54	85	54	6	7	12	88	74	74
16:00	94	117	98	90	108	38	151	159	2	1	104	6	84	56	80	42	72	38	29	54	178	178	166	220	230	199	148	188	147	185	69	86	76	60	94	67	94	67	12	13	43	108	86	86
16:15	124	121	101	126	112	80	127	199	2	1	114	4	91	106	71	72	64	66	26	80	184	158	122	200	218	154	132	212	131	208	83	89	71	95	104	110	104	110	14	16	38	97	99	99
16:30	106	130	111	119	123	52	107	253	2	1	88	3	70	74	52	52	47	48	19	58	182	163	158	202	190	130	133	210	132	204	65	80	73	71	90	84	90	84	10	12	28	88	99	99
16:45	103	125	101	120	112	55	117	136	2	1	86	3	64	82	50	54	45	49	18	59	182	169	144	270	225	137	137	180	136	177	70	98	63	70	85	78	85	78	10	12	27	77	91	91
17:00	116	123	101	129	112	68	130	138	2	1	82	4	63	72	53	49	48	44	19	56	168	137	109	257	154	150	139	182	138	178	61	68	69	59	87	64	87	64	10	11	29	91	101	101
17:15	130	111	87	142	97	67	132	203	2	1	95	4	72	52	56	42	50	38	20	50	173	174	130	227	205	137	155	167	154	165	75	100	71	69	83	86	83	86	10	12	30	86	107	107
17:30	136	129	103	152	114	123	127	169	2	1	94	4	70	54	55	41	50	37	20	49	188	132	180	292	258	161	159	192	158	187	74	72	77	66	88	83	88	83	10	12	30	82	99	99
17:45	140	128	108	149	119	93	125	238	1	1	70	3	48	54	62	40	56	36	22	49	176	159	155	277	222	202	124	209	123	204	76	81	67	54	76	66	76	66	10	11	33	124	88	88
18:00	109	152	132	124	146	56	132	198	2	1	96	4	77	41	60	37	54	33	22	46	200	188	152	260	202	164	156	224	155	219	65	86	77	69	86	91	86	91	10	12	32	102	113	113
18:15	125	124	104	129	115	49	113	290	1	1	92	3	72	48	68	36	61	34	24	48	215	167	130	242	204	146	120	199	119	194	69	95	61	56	78	64	78	64	10	11	37	71	107	107
18:30	139	131	109	145	121	70	112	234	1	1	92	3	72	48	69	35	62	32	25	46	192	202	166	252	214	168	116	206	116	201	67	75	69	50	82	57	82	57	10	11	37	90	102	102
18:45	105	112	91	110	101	62	113	177	1	1	96	6	69	81	65	53	58	48	23	62	168	172	182	214	264	178	139	156	138	153	82	73	63	60	88	60	88	60	12	13	35	92	97	97

Tabla 7. Matriz de datos de la sección Red 4