

**MODERNIZACIÓN DE LA RED SEMAFÓRICA DE LA CIUDAD DE
BUCARAMANGA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE SEMAFÓROS
INTELIGENTES**

**LILIANA CHÍA FUENTES
JESÚS ORLANDO ESCALANTE TORRADO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2011**

**MODERNIZACIÓN DE LA RED SEMAFÓRICA DE LA CIUDAD DE
BUCARAMANGA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE SEMAFÓROS
INTELIGENTES**

**LILIANA CHÍA FUENTES
JESÚS ORLANDO ESCALANTE TORRADO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

**Director:
HERNÁN PORRAS DÍAZ
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.**

**Codirector:
CARLOS ENRIQUE BUENO CADENA
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

*A Dios por haberme dado la fuerza suficiente y valor
Para no dejarme desfallecer a pesar de las dificultades
Que se presentaron en el transcurso de mi carrera;
A mis padres y hermanos, que de una u otra forma aportaron
Su granito de arena para lograr este triunfo.*

Liliana Chía Fuentes

*Todo es una sola cosa.
Y cuando quieres alguna cosa,
Todo el Universo conspira para que realices tu deseo.*

El Alquimista, Paulo Coelho

*A la Vida por hacerme parte de su Creación;
A mis Padres y Hermano, complementos de mi vida;
A mi Abuela materna, mi segunda madre,
Y a todas las personas que han pasado por mi vida,
Porque de cada una de ellas he aprendido algo.*

Jesús Orlando Escalante Torrado

AGRADECIMIENTOS

Es preciso de este proyecto y de sus autores expresar sus agradecimientos, en primer lugar, a la Universidad Industrial de Santander por su invaluable aporte académico, social y cultural; a, no solo a sus miembros, sino también a toda la región. Igualmente, agradecer a la Escuela de Ingeniería Civil, por la calidad de su componente humano y profesional, elementos importantes de formación.

A nuestro director de proyecto y profesor, Hernán Porras; por su apoyo, colaboración y las oportunidades dadas; que permitieron la realización del proyecto.

Un agradecimiento muy especial al ingeniero Carlos Bueno, por su colaboración incondicional, apoyo constante; por la motivación e impulso dados en los momentos difíciles del proyecto; por sus conocimientos, y, porque sin su ayuda, habría sido aún más difícil alcanzar el objetivo; gracias.

Agradecer a los funcionarios de la Subdirección de Tránsito de Bucaramanga, por su colaboración con la información solicitada y, por sus grandes aportes de conocimiento y experiencia en el tema del proyecto.

Igualmente importante, agradecer a los compañeros del Grupo de Investigación Geomática, por su acompañamiento, apoyo y buena energía. A ellos que valoraron nuestro trabajo y fueron cómplices de nuestro esfuerzo y éxito.

Finalmente, un agradecimiento fraterno a todos nuestros amigos, que estuvieron allí, con sus buenos deseos y amistad sincera, éxitos a todos.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	18
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	23
2.1 Objetivo General	23
2.2 Objetivos Específicos	23
3 MARCO CONCEPTUAL.....	24
3.1 Control de tráfico	24
3.2 Control semafórico de tráfico.....	26
3.3 Sistema operacional de los semáforos.....	27
3.4 Sistemas de prioridad semafórica	31
4 DIAGNOSTICO DE INFRAESTRUCTURA Y CONTROL DE TRÁFICO....	34
4.1 Infraestructura vial.....	36
4.1.1 Clasificación de la malla vial de acuerdo a número de calzadas y carriles	39
4.1.2 Clasificación de la malla vial por sentidos viales	41
4.1.3 Clasificación de corredores viales por anchos de calzadas vehiculares	41
4.2 Control semafórico	44
4.2.1 Red de comunicaciones de datos	49
4.2.2 Central de control	49
4.2.3 Equipos de control.....	51
5 ASPECTOS GENERALES DE LA MOVILIDAD EN BUCARAMANGA.	57
6 SELECCIÓN DEL CONTROL Y DISEÑO DE LA RED SEMAFORICA.....	63

6.1	Metodología del proyecto	77
6.2	Diseño general red semafórica.....	79
7	COSTOS Y CONSIDERACIONES DE TIEMPOS DE VIAJE DE USUARIOS	84
8	CONCLUSIONES.....	89
9	RECOMENDACIONES	91
10	INVESTIGACIONES FUTURAS.....	92
	BIBLIOGRAFIA.....	93
	ANEXOS	97

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Intersección normal a tiempos fijos.....	28
Figura 2. Intersección típica control actuado	29
Figura 3. Clasificación vial de acuerdo al número de calzadas	40
Figura 4. Clasificación vial de acuerdo a los anchos de calzada	42
Figura 5. Ubicación de las intersecciones con semáforo	48
Figura 6. Tipología de equipos instalados en el sistema semafórico actual	52
Figura 7. Esquema general de la conexión actual de los equipos de control.	53
Figura 8. Detalle conexión actual Equipos de Control - Semáforos	54
Figura 9. Intersecciones controladas por el mismo equipo	55
Figura 10. Distribución de rutas de transporte público en Bucaramanga.....	58
Figura 11. Evolución de los viajes motorizados 2005-2025	59
Figura 12. Congestión corredor Carrera 13	61
Figura 13. Estado de la malla vial de acuerdo a la relación Volumen/Capacidad..	62
Figura 14. Red Vial Principal considerada	64
Figura 15. Ubicación intersecciones con aforos.....	65
Figura 16. Intersecciones para el análisis.....	66
Figura 17. Guía recomendada para la selección del tipo de control	67
Figura 18. Relación Volumen- Capacidad Intersección K33 - C56	69
Figura 19. Cantidad Rutas de Buses Intersección K33 - C56.....	69
Figura 20. Aforo Vehicular Intersección K33 - C56	70
Figura 21. Intersecciones semaforizadas y tipo de control semafórico propuesto .	74
Figura 22. Corredores viales con prioridad al transporte público	75
Figura 23. Ejemplo Control Semiactuado	76
Figura 24. Diagrama metodológico del proyecto.....	78
Figura 25. Equipos de control, actuales y adicionales	80
Figura 26. Red de conexión complementada	81

Figura 27. Esquema Red Semafórica Propuesta.....82
Figura 28. Configuración típica de detectores en una intersección.....83

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Definición red vial.....	38
Tabla 2. Longitud de vías de acuerdo a su configuración.....	38
Tabla 3. Estadística de la malla vial de acuerdo al número de carriles.....	39
Tabla 4. Estadísticas de la malla vial de acuerdo a los sentidos viales	41
Tabla 5. Estadística de la malla vial de acuerdo a los anchos de calzadas.....	42
Tabla 6. Pavimentos existentes en Bucaramanga	43
Tabla 7. Estado de pavimento por clase de red.....	43
Tabla 8. Ubicación de intersecciones con semáforo.....	44
Tabla 9. Caracterización de los equipos de semáforos actuales	51
Tabla 10. Listado de intersecciones semaforizadas y tipo de control	70
Tabla 11. Costos de implementación red semafórica	85
Tabla 12. Resultados representativos de evaluación de rendimiento	87
Tabla 13. Tiempos de viaje en la red actual y propuesta.....	87

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A: TUTORIAL DE CONTROL SEMAFORICO	97

RESUMEN

TITULO: MODERNIZACION DE LA RED SEMAFORICA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA MEDIANTE LA IMPLEMENTACION DE SEMAFOROS INTELIGENTES*

AUTORES: CHIA FUENTES, Liliana
ESCALANTE TORRADO, Jesús Orlando**

PALABRAS CLAVES: Modernización, Semáforos inteligentes, Control semafórico, Red semafórica Bucaramanga, Tutorial.

DESCRIPCION:

Calles y carreteras en las grandes ciudades presentan cada vez más altos niveles de congestión; y, a medida que la población aumenta, esta situación seguirá presentándose; sin estrategias prontas y claras de solución, será cada vez más difícil hacer frente a esta problemática, que abarca no solo lo económico y social, sino además, incluye el tema medioambiental.

Además de este aumento de los usuarios de las vías, existe un factor limitante en la elaboración de estrategias de solución; es el caso, de la infraestructura vial "oferta del transporte", la cual, no puede exceder la capacidad de la ciudad. Por lo tanto, las estrategias, elaboradas actualmente, deben estar dirigidas hacia la modernización de los sistemas de control de tráfico, semafórico o no.

En este trabajo de grado, se realiza una revisión del tema control semafórico, así como, de las diferentes estrategias que este ofrece; y, de esta manera, determinar qué medidas son las más adecuadas para implementar en la Ciudad. La búsqueda y consolidación de datos de campo y, una fuerte revisión bibliográfica, para la obtención del diagnóstico y un tutorial, respectivamente, hacen parte de los procedimientos iniciales para fundamentar la selección del control de tráfico, el cual, está basado en un sistema de control actuado.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hernán Porras Díaz, Codirector: Carlos Enrique Bueno Cadena.

SUMMARY

TITLE: MODERNIZATION TRAFFIC LIGHTS NETWORK OF THE CITY BUCARAMANGA BY IMPLEMENTING INTELLIGENT TRAFFIC LIGHTS*

AUTHORS: CHIA FUENTES, Liliana
ESCALANTE TORRADO, Jesús Orlando**

KEY WORDS: Modernization, Intelligent traffic lights, Traffic light control, Traffic light network Bucaramanga, Tutorial.

DESCRIPTION:

Streets and roads in major cities have increasingly high levels of congestion and, as the population increases, this situation will continue performing, without prompt and clear strategies for solution, it will become increasingly difficult to cope with this problem, which includes not only economic and social, but also includes environmental issues.

In addition to this increase in road users, there is a limiting factor in the development of solution strategies, it is the case of road infrastructure "supply of transportation", which can't exceed the capacity of the city. Therefore, the strategies developed at present, must be directed toward the modernization of traffic control systems, traffic light or not.

In this work of degree, we review the issue traffic light control, as well as the different strategies it offers, and, thus, determine what measures are most appropriate to implement in the City. The search for and consolidation of field data and a strong literature review, to obtain the diagnostic and tutorial, respectively, are part of the initial procedures to support the selection of traffic control, which is based on a actuated control system.

* Work Degree

** Faculty of Physical – mechanical Engineering, Civil Engineering School, Director: Hernán Porras Díaz, Tutor: Carlos Enrique Bueno Cadena.

INTRODUCCION

Calles y carreteras en las grandes ciudades presentan cada vez más altos niveles de congestión, y, a medida que la población aumenta, esta situación seguirá presentándose; sin estrategias prontas y claras de solución, será cada vez más difícil hacer frente a esta problemática que abarca no solo lo económico y social, sino además, incluye el tema medioambiental.

Este proyecto más allá de ofrecer soluciones inmediatas a través de métodos o modelos teóricos complejos; busca presentar alternativas de solución mediante sistemas de gestión del tráfico; que aunque llevan años de aplicación en otros lugares del mundo y han presentado soluciones eficientes para el problema de congestión, no son de amplio conocimiento ni difusión en Bucaramanga.

En base a esa situación, se ha elaborado en este proyecto un sencillo tutorial, en el cual, se da a conocer los aspectos más importantes en el proceso de aprendizaje del tema de Semáforos Inteligentes, entendido como sistemas de control de tráfico que utilizan dispositivos adicionales que toman información en la vía para su mejor desempeño.

Considerando la información conceptual en el tema y sumada la información referente a la situación actual de la Ciudad en Infraestructura, control semaforico y aspectos generales de la movilidad; es propio de este proyecto realizar un diseño a grosso modo, de las estrategias de control que a consideración pueden ser implementadas.

Igualmente, es de interés de este proyecto ser un precursor de innumerables estudios e investigaciones que se desarrollen alrededor del tema del transporte en la Universidad, considerando la importancia que la correcta gestión de este representa para el desarrollo y consolidación de ciudades sostenibles.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La congestión vehicular como fenómeno que afecta la movilidad urbana hasta hace pocos años era considerada como un problema de exclusivo tratamiento en las grandes metrópolis de los países desarrollados; sin embargo, durante las últimas décadas su efecto se ha extendido al resto del mundo y en las ciudades latinoamericanas se ha afianzado como resultado del aumento representativo de las tasas de motorización (CEPAL, 2001). En Latinoamérica, el cambio de las tasas de motorización se encuentra intrínsecamente relacionado con el aumento de los niveles de ingresos de los ciudadanos y la reducción de los aranceles facilitada por las reformas económicas y el efecto de la globalización de la economía.

Es claro que la congestión vehicular es causante de serios problemas y desafíos en muchas de las ciudades modernas del mundo. Para un conductor o viajero, la congestión significa pérdida de tiempo, oportunidades perdidas y frustración. Para un empleador la congestión significa pérdida de la productividad del trabajador, oportunidades comerciales, demora en las entregas e incremento en los costos. Para solucionar o minimizar estos y muchos otros problemas que genera la congestión no solamente es necesario la construcción de infraestructura sino también y en mayor medida, la utilización de las herramientas tecnológicas que se han desarrollado en torno a la regulación del tráfico (W. Wen, 2008).

Colombia no ha sido ajena a los problemas de movilidad, y el considerable aumento de la población en varias de sus ciudades –por diferentes motivos- ha agudizado este fenómeno de congestión, pues a medida que crece la ciudad, aumenta la necesidad de movilizarse en ella, lo cual, genera la creciente demanda de vehículos públicos y privados, y por consiguiente, el aumento descontrolado del parque automotor (POZUETA, 2000). Esta demanda ha sido favorecida o impulsada en gran medida por las facilidades financieras que encuentran los

compradores en los diferentes concesionarios, pues supone cobros con bajos intereses y a largo plazo. Esto sumado a la falta e incumplimiento de políticas o normatividad que lleve un control serio sobre estas irregularidades, con la consecuente incapacidad de respuesta a un plan de contingencia (eventos, accidentes, mantenimiento de las vías, etc.) (Diagnostico del Plan Maestro de Movilidad Urbana para el Municipio de Bucaramanga, 2010).

Sin embargo, la problemática de la congestión vehicular va más allá, y en ciudades como Bucaramanga supone otros causantes anexos al del aumento de vehículos. El territorio con el que cuenta una ciudad es un factor limitador para la movilidad (POZUETA, 2000), y en Bucaramanga ya es visible que se ha alcanzado la capacidad máxima del territorio; además de esto, la falta de una gran red de vías principales hace difícil la posibilidad de elaborar una estrategia eficiente para la circulación, igualmente, la estructura urbanística con la que fue diseñada la Ciudad no previó los problemas actuales de congestión, lo cual propone implementar una metodología alternativa para comprender, analizar y optimizar el manejo del flujo vehicular actual.

La implementación de estrategias de control semafórico presenta soluciones en las que se utilizan medidas de gestión del tráfico acorde a las necesidades que un corredor vial presenta; la importancia de la utilización de estrategias de gestión de tráfico radica en la elaboración de planes de movilidad que no requieren de grandes acondicionamientos de infraestructura y están basados en el control del tráfico en tiempo real.

De no ser así, este gran problema en donde la malla vial principal de la Ciudad está saturada, obliga a las instituciones gubernamentales a diseñar planes de movilidad en los que se involucre las vías secundarias, adelantando proyectos costosos de ampliación y compra de predios que no siempre son los correctos, y que generan no solo un impacto ambiental, sino además, un costo social alto,

representado en el descontento de la población que no estará dispuesta a apoyar proyectos futuros.

Además, añadir a la malla vial las vías secundarias -ubicadas en sectores residenciales-, agrava aún más el ya complicado panorama medioambiental, debido a que se trasladan los problemas, la contaminación auditiva, y el estrés que genera toda esta situación conlleva al aumento de accidentes de tránsito que va en detrimento de la calidad de vida de las personas; otro problema es la polución, que aumenta con la congestión, ya que el hecho de detenerse en cortos lapsos de tiempo hace que el vehículo fuerce el motor realizando arranques y paradas más regulares que generan mayor consumo de combustible y por lo tanto mayores emisiones de agentes contaminantes como el CO₂.

La problemática de movilidad en la Ciudad se retroalimenta así misma considerando que las medidas que se han tomado buscan simplemente alargar la situación en el tiempo, en la medida en que se intervienen más vías para ampliarlas y adecuarlas para que reciban un mayor flujo, sin embargo, no se considera que en algún momento se sobrepasará la capacidad y el problema reaparecerá.

Actualmente, la ciudad de Bucaramanga presenta una desactualización de la red semafórica, ya que los aparatos y equipos que se emplean presentan tiempos de uso de 15 a 30 años (Vanguardia.com, 2008); y aunque en su funcionamiento operacional no presentan problemas más allá de ajustes de mantenimiento, si representan desventajas en cuanto al control y regulación del tráfico vehicular, debido a que toda la red semafórica maneja planes de tráfico de tiempos fijos, lo que significa, control basado en conteos vehiculares realizados con anterioridad que no reflejan la dinámica y variabilidad en el tiempo del comportamiento de los flujos de tráfico en la Ciudad.

A parte de cómo se encuentra conformada la Ciudad en temas de infraestructura vial y señalización es importante mencionar la falta de estudios realizados en el tema de control semafórico, reflejado en la escasa información en el tema; en el que se desconoce las posibles herramientas que pueden ser aplicadas y los beneficios que ofrecen a la movilidad vehicular y peatonal.

Es por eso, que a través de este proyecto se pretende abordar conceptualmente el tema de control semafórico, en el cual, se tendrán en cuenta datos de aforos vehiculares, así como, la red semafórica que la Ciudad presenta actualmente; y de esta manera fundamentar la estrategia que se plantea a través de semáforos inteligentes para mejorar la movilidad vehicular y peatonal.

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1 Objetivo General

- Diseñar una estrategia para mejorar la movilidad vehicular y peatonal de la ciudad de Bucaramanga mediante la modernización de la red semafórica utilizando semáforos inteligentes.

2.2 Objetivos Específicos

- Elaborar un tutorial de control semafórico de tráfico.
- Proponer un diseño de la red de semáforos inteligentes para la ciudad de Bucaramanga utilizando criterios de priorización de tráfico.
- Evaluar los costos de la infraestructura requerida y de los tiempos de viaje de los usuarios para la red actual y para la red semafórica propuesta.

3 MARCO CONCEPTUAL

La siguiente información se presenta como referencia conceptual, la cual, se encuentra igualmente contenida en el Tutorial de Control Semafórico presentado como la revisión bibliográfica del proyecto actual, en el Anexo A. El Tutorial es de gran importancia para la comprensión del presente documento, ya que recopila y organiza todas las ideas y conceptos que son desarrollados en la extensión del proyecto; y que se encontraban dispersa en toda la bibliografía consultada.

La importancia del Tutorial radica en que sirve como material de publicación independiente, esto en el sentido en que no es solo aplicable para la comprensión del proyecto actual, sino que además, su elaboración estuvo orientada a consolidarlo como material de consulta general y de aprovechamiento para el aprendizaje y con posibilidad de ser actualizado según se requiera.

3.1 Control de tráfico

La utilización de las vías urbanas por parte de vehículos y peatones, crea escenarios que deben ser compartidos por estos, asegurando la seguridad y el bienestar en el uso de ellos. Es en base a este principio básico que se hace necesario la implementación de elementos que controlen y regulen esta interacción entre vehículos, peatones y las vías.

Existen dos tipos de métodos para el control de tráfico que son: los métodos formales e informales. Los métodos formales son las señales, demarcaciones en el pavimento y los semáforos; y los métodos informales son: la geometría de la vía, experiencias personales y conocimientos previos. El tema se va a enfocar en los métodos formales, debido a que estos son los que pueden ser modificados más fácilmente.

Las señales de tránsito son una valiosa herramienta para mejorar la seguridad y eficiencia del tránsito vehicular y peatonal presente en un corredor vial. Se utiliza para tener informado al conductor acerca de las características de la vía por la cual se circula. Así, sirve para advertir de la existencia de peligros, informar sobre normas viales y ubicar al conductor dónde se encuentra y cual ruta debe tomar.

Estas **señales de tránsito** se colocan a lo largo, al lado o por encima de una carrera, camino o ruta, y se clasifican en señalización horizontal, vertical y electrónica. La Señalización horizontal, corresponde a las marcas viales, conformadas por líneas, flechas, símbolos y letras que se pintan sobre el pavimento, bordillos o sardineles y estructuras de las vías de circulación o adyacentes a ellas; la señalización vertical se basa en la implementación de placas fijadas en postes o estructuras sobre la vía o adyacentes a ella y de acuerdo con la función que cumplen estas señales se clasifican en: señales preventivas, reglamentarias e informativas; y por último la señalización electrónica que corresponde a los semáforos.

Los **semáforos** son dispositivos electrónicos de señalización que sirve para controlar y dar seguridad a los conductores de los vehículos y los peatones en las intersecciones, mediante la asignación de derecho de vía en las diferentes direcciones. El semáforo está compuesto de una serie de elementos físicos y funcionales, tales como: cabeza que es la parte visible del semáforo, la cara donde se encuentran ubicadas las luces de indicación; los lentes, las viseras que se encuentran colocadas encima de las unidades ópticas; los soportes y las placas de contraste. En la cara de los semáforos, existen dos o tres unidades ópticas según el tipo de semáforo que da las indicaciones a los conductores o peatones de cuándo parar y cuándo seguir, de acuerdo a las indicaciones de luces de color rojo, que significa que el tránsito vehicular o peatonal debe detenerse antes de la línea de pare, amarillo que advierte a los conductores de los vehículos que el tiempo de rojo o verde se ha terminado, y, verde que significa que los vehículos o

peatones pueden seguir la marcha de frente o los vehículos pueden girar a la izquierda o la derecha según las indicaciones de las flechas; estas indicaciones son operadas por una unidad electrónica de control que se encuentra localizada en la central semafórica de la Ciudad

3.2 Control semafórico de tráfico

Los controles semafóricos de tráfico son implementados para dar derecho de paso a cada acceso de las intersecciones según las indicaciones y por ende para reducir o eliminar los conflictos en estas. Para determinar si una intersección debe ser semaforizada se debe cumplir una o más de los siguientes criterios: un volumen mínimo de vehículos en todos los accesos de la intersección, interrupción de tráfico continuo, volumen mínimo de peatones que cruzan por la vía principal; movimiento o circulación progresiva, antecedentes y experiencia sobre accidentes, y la combinación de los criterios anteriores.

Para justificar la implementación de un semáforo cuantitativamente según el flujo de cada acceso de la intersección se tienen en cuenta las tablas mostradas en el Tutorial de Control semafórico de tráfico, Anexo A.

Para implementar un control semafórico también se debe seguir un procedimiento para justificar la necesidad técnica. Lo primero que se debe realizar es conformar la base de datos estableciendo las intersecciones que posiblemente necesitan un control semafórico; posteriormente, se toma la información básica que tiene que ver con los volúmenes vehiculares y peatonales; luego, a partir de la información recolectada se verifica el cumplimiento de los criterios mínimos y por último se hace una priorización con base en el cumplimiento de los criterios evaluados.

Después de establecer cuales intersecciones se van a semaforizar, se determina el sistema operacional, es decir, se eligen los movimientos permitidos, el número y

duración de las fases, y, teniendo en cuenta la complejidad de las intersecciones y la distancia entre ellas, se determina el tipo de control a implementar los cuales se describen a continuación.

3.3 Sistema operacional de los semáforos

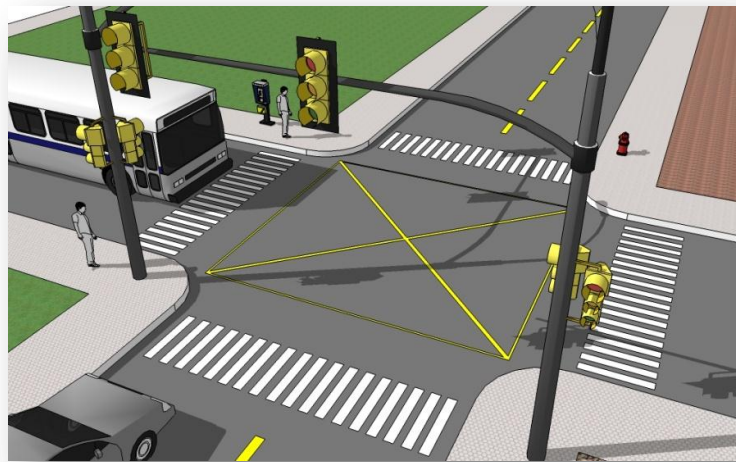
Un semáforo puede operar de forma aislada, es decir, que no dependa de otro sistema para su funcionamiento, o, coordinada que son semáforos que operan con el mismo ciclo o múltiplo de este en intersecciones adyacentes. La coordinación de una red semafórica se puede realizar mediante conexión física o mediante sincronismos, pero, existe la posibilidad de que la red no opere correctamente por interferencias en el medio. Cuando la coordinación es física se realiza la conexión mediante cables tipo telefónico. Otra forma de operación es el sistema centralizado en el cual todas las indicaciones son asignadas desde una central de control.

Independientemente del tipo operacional que se deba utilizar, existen dos tipos básicos de controladores: controladores de tiempo fijo y por demanda de tráfico o actuados.

Los sistemas de control pre-sincronizado o de tiempo fijo son sincronizados mediante datos históricos recopilados de los flujos en todos los accesos de las intersecciones semaforizadas, donde el tiempo del ciclo es constante y la duración de los instantes de cambio de las fases son en relación al ciclo. Los controladores de tiempo fijo son los más sencillos que existen, de bajo costo y de fácil operación. Esta forma de control de tráfico es aceptable para intersecciones, arterias o redes viales con muy poca variación de volúmenes de tráfico, en los cuales los beneficios de los controladores actuados no justifican el costo.

Los sistemas de tiempo fijo pueden ser operados eficientemente usando configuraciones derivadas de software de optimización disponibles. Los objetivos de optimización están orientados a maximizar las oportunidades de avance y proporcionar prioridad a movimientos arteriales. Igualmente este sistema de tiempos fijos opera bastante bien cuando los volúmenes de tráfico son predecibles y predominantes en una dirección.

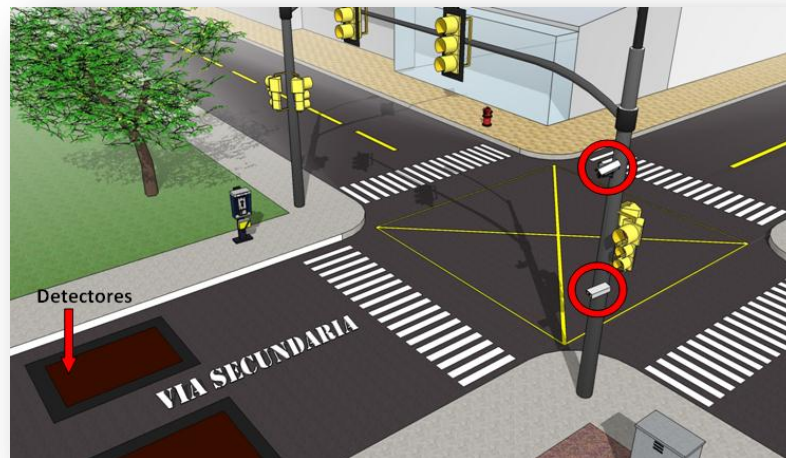
Figura 1. Intersección normal a tiempos fijos



Fuente: Elaboración propia

El otro tipo de controlador es el **actuado** o por demanda de tráfico. Es más complejo que el controlador de tiempo fijo, por depender de detectores para los vehículos que se aproximan en los accesos de la intersección. El objetivo de este controlador es dar un tiempo de verde a cada corriente de tráfico de acuerdo a la necesidad de paso, ajustando este tiempo de acuerdo a las fluctuaciones de tráfico que se pueden presentar en la intersección.

Figura 2. Intersección típica control actuado



Fuente: Elaboración propia

Existen tres tipos de controlador actuado: semiactuado, completamente actuado y de volumen densidad (adaptativo).

El controlador semiactuado puede ser usado en intersecciones donde la vía principal o arterial con flujo relativamente uniforme es atravesada por una vía secundaria con velocidades de operación y variaciones de volumen relativamente bajas. La fase principal mantiene indefinidamente la señal de verde hasta que el detector vehicular, localizado en el acceso a la intersección en la vía secundaria, actúa.

En **el control totalmente actuado** o de “operación libre” todos los accesos requieren de detectores, de modo que el ciclo, la duración y la secuencia de intervalos están controlados por el flujo de tráfico de la intersección, este tipo es recomendado para intersecciones aisladas. Y el control adaptativo es el más complejo y costoso de todos. La operación de este tipo de control es a veces usado en intersecciones con volúmenes relativamente iguales pero diferentes ajustes de tiempos y distribuciones esporádicas de tráfico. Cada fase tiene un

periodo de verde mínimo para proporcionar progresión a una cola. Las fases pueden ser mantenidas o reprogramadas para dar prioridad, dependiendo de la demanda de tráfico en las otras fases.

Para el control adaptativo existen estrategias centralizadas como: SCOOT (*Split Offset Optimization Technique*), SCATS (*Sydney Coordinated Traffic Control System*), RHODES, MOTION Y TUC, entre otras, y estrategias descentralizadas como: UTOPIA, PRODYN Y OPAC (*Optimized Polices for Adaptive Control*), entre otras.

Estos controladores son más sofisticados que los totalmente actuados en la medida en que ubica detectores en todos los accesos a la intersección en cuestión, y de acuerdo a esta información crea planes y estrategias de ajuste de tiempos, realizando predicciones del comportamiento del tráfico. Estas predicciones las realiza en base a las detecciones que realiza en la intersección donde está ubicado el controlador, pero, también tiene en cuenta las detecciones en las intersecciones adyacentes.

La operación en un sistema coordinado es dependiente de la información que los detectores instalados en la vía proporcionan. Según Roess et al, 2004¹ los detectores son usados para sentir el paso o presencia a través de una zona específica; de todos los usuarios de la vía, incluyendo los vehículos de tamaño legal, vehículos potenciados por humanos, así como, bicicletas y sillas de ruedas, y peatones.

Los detectores conducen una variedad de funciones en el área del transporte mediante la detección de la llegada de vehículos; velocidad del tráfico, densidad u ocupación y el volumen de tráfico, el cual, puede dar información acerca del

¹ YUU, Ilsoo, *Stochastic Optimization Method for Coordinated Actuated Signal Systems*, 2005.

estado del sistema actual. Los detectores son un requerimiento primario para el control actuado, ya que la detección y transferencia de la información detectada es la que permite al controlador dar el derecho de vía o realizar una extensión de verde.

El tipo de detección en los sistemas de control actuado pueden ser dividido en dos tipos: puntos de detección y áreas de detección; sin tener en cuenta el tipo de dispositivo a utilizar. La elección de uno u otro tipo de detección o una combinación de ellos influyen directamente en el rendimiento del sistema.

La tecnología alrededor de los detectores ha avanzado considerablemente, sin embargo, existen tres tipos de detectores y sus combinación; que son más comúnmente usados; primero, los lazos de inducción; segundo, los detectores de video, y tercero, los detectores de microondas. Ver anexo A.

Finalmente, la selección de un detector apropiado depende de los costos de instalación, el tipo de detección deseado, las dificultades de mantenimiento, la geometría de la vía, las condiciones del pavimento, el clima y la adaptación a cambios futuros en la vía.

3.4 Sistemas de prioridad semafórica

Los sistemas de prioridad semafórica son dispositivos que permiten crear estrategias que beneficien a cierto tipo de vehículo, asignando derecho de vía, al este ser detectado; generalmente es utilizado para dar prioridad a sistemas de transporte público organizado, es decir, sistemas de transporte masivo que tienen un control más estricto con la frecuencia de sus rutas –principal condición para la implementación de esta estrategia-.

El objetivo fundamental de este sistema es el reducir los tiempos de viaje a los usuarios y los costos que esta demora representa. Igualmente esta estrategia

busca desestimular el uso del transporte particular, mejorando el sistema de transporte público, para de esta manera evitar el aumento del parque automotor en las ciudades. Dentro de estos sistemas se encuentran los sistemas pasivos, activos y adaptativos.

Los sistemas pasivos de prioridad semafórica están basados en controles de tiempo fijo, los cuales son sincronizados teniendo en cuenta el tiempo que tardan los autobuses de una intersección a otra y las demoras por paradas y posibles obstáculos, para que siempre que lleguen a cada intersección encuentren el semáforo en verde; a esta estrategia se le denomina ola verde.

Las estrategias activas de prioridad semafórica funcionan mediante detectores ubicados en las cercanías de las intersecciones, de modo que cuando el autobús se esté acercando envíe información mediante un emisor ubicado dentro de él al detector, para que le de paso automáticamente sin ninguna espera haciendo modificaciones en el sistema. La modificación del sistema puede llevarse a cabo mediante las siguientes estrategias: Extensión de verde, el cual solo funciona si la fase es verde al acercamiento del autobús; Truncado de rojo, se aplica cuando la fase es de color roja al acercamiento y Fase actuada, que se trata en insertar una fase de verde corta entre una roja.

Figura 1. Esquema básico de Sistema de Priorización



Fuente: Elaboración propia, basada en el *Transit Signal Priority Handbook*, 2005.

Y por último, tenemos los sistemas de tiempo real o adaptivos que tienen en cuenta al transporte público masivo al mismo tiempo que al transporte privado. Funciona de igual manera que los sistemas activos pero adicionalmente se ubican detectores en el acceso donde transitan vehículos privados, para que cuando no haya flujo de transporte público y la fase para estos sea roja pueda accionarse la fase de verde y puedan seguir su rumbo sin necesidad de detenerse. Ver Anexo A, Capítulo 5.

4 DIAGNOSTICO DE INFRAESTRUCTURA Y CONTROL DE TRÁFICO

Reconocer los parámetros que intervienen en el tema de movilidad urbana y sus problemas, y, más específicamente en el tema de congestión vehicular, es el primer paso que se debe dar para iniciar la búsqueda de soluciones, o, al menos, para entender el contexto en el cual se puede manejar el tema.

Es claro, que el problema de congestión que se presenta en la mayoría de ciudades, desarrolladas o no; se debe en gran medida al uso intensivo del automóvil, cuya adquisición se ha facilitado gracias a decisiones económicas basadas en bajos intereses de financiación y modalidades de pago a largo plazo; esto sumado al constante aumento de la población urbana, que resulta en la alta densificación de los sectores de la ciudad, lo cual obliga a instalarse en la periferia de las ciudades, y por lo tanto, creando la necesidad de desplazarse a mayores distancias. Además, de las claras deficiencias en cuanto a diseños que favorezcan la movilidad en la ciudad, cabe mencionar las malas actitudes y costumbres de los conductores sobre las vías, así como, las deficiencias institucionales para el control operacional del transporte (Diagnostico de Movilidad, UIS, 2009).

No obstante, el tema de congestión debido a su connotación de problema social debe ser abordado desde una perspectiva más global, en la que se involucren todos los agentes que intervienen y otros que deberían ser considerados.

Es necesario analizar el transporte desde la interacción entre oferta (infraestructura y gestión) y demanda (uso de las vías), con el fin de abordar el problema de manera integral y poner en práctica un conjunto de medidas factibles que signifiquen mejorar la productividad del sistema de transporte urbano, sin perder de vista que la aplicación de una medida pueda repercutir en otros aspectos de la circulación vehicular (CEPAL, 2003).

Hablar de la oferta de transporte, es hablar de los elementos que permiten y hacen posible el transporte, sea de personas y/o de mercancías; entre ellos la infraestructura vial, considerada el pilar de crecimiento y desarrollo sostenible de un país (I. Vélez, Uniandes), la cual, está conformada por vías e intersecciones que dependiendo de su geometría y estado, representa ventajas y desventajas para la movilidad. Por otra parte, se encuentran los medios de transporte representados por los vehículos que utilizan las calles y avenidas de las ciudades, y que van desde automóviles hasta vehículos de gran tamaño, pasando por los de servicio público.

Sin duda alguna, esta variedad de medios de transporte representa un tema complicado, debido a que cada uno presenta un nivel de servicio diferente y son analizados de manera independiente cuando se trata de capacidad y optimización. Ahora bien, para abordar el tema de oferta de la demanda de manera global, es necesario relacionar los dos elementos antes mencionados – infraestructura vial y medios de transporte– a través de lo que se conoce como “gestión del sistema de transporte”. Es claro, que no es suficiente con que se asignen flujos en ambos sentidos en una vía, ni que se ubiquen semáforos en todas las intersecciones viales, o, que la ocupación media de los vehículos sea la óptima para el sistema. En realidad, es la interacción entre la infraestructura, los vehículos y la gestión de transporte la que contribuye a configurar la capacidad u oferta del transporte (CEPAL, 2003).

Actualmente, en Bucaramanga los temas de infraestructura vial y medios de transporte no pasan por un buen momento, ya que se han visto afectados debido a la falta de nuevos corredores viales, el aumento de la motorización, así como, por la invasión del espacio público, entre otros aspectos. Todo ello, resulta en un déficit de la capacidad de regular el flujo vehicular y tomar medidas que permitan mejorar esta situación; lo que conlleva en definitiva a los altos niveles de congestión que se han vuelto recurrentes.

Es imperativo en este sentido, presentar el estado actual de movilidad de la Ciudad, a través del diagnóstico de solamente algunos temas que son de apoyo para el presente proyecto; teniendo en cuenta que la movilidad abarca un sinnúmero de variables y temas, y que no todos pueden ser abarcados en este documento.

Adicionalmente, de mencionar el estado de las vías y la falta de ellas, es necesario mostrar y revisar cómo está conformado el sistema de control de tráfico, el cual, está basado en señalización y demarcaciones viales, así como, el sistema de regulación semafórico presente. Siendo este último, el cual se tratará, en mayor medida.

Los temas que a continuación se presentan han sido tomados del Plan Maestro de Movilidad Urbana, realizado por la Universidad Industrial de Santander y otras entidades.

4.1 Infraestructura vial

En el tema de infraestructura vial y de acuerdo al Plan Maestro de Movilidad Urbana, la ciudad de Bucaramanga está conformada por 683,6 Km/calzada de malla vial urbana, de los cuales 139,4 Km son vías peatonales, y los restantes 544,1 Km/calzada corresponden a la red vehicular. Sin embargo, de esta última 32% se consideran en buen estado, para lo cual sólo se requieren trabajos de mantenimiento rutinario; 40% es aceptable, 21% es regular y tan sólo 7% ya ha cumplido su vida útil y es necesario su reconstrucción.

Ahora, de acuerdo al Plan de Ordenamiento Territorial los 544,1Km/calzada que corresponden a la red vehicular, se han clasificado en base a la función, el uso, su localización que cumple dentro de la estructura urbana, en: Sistema Vial Arterial y Vías de la Red Local.

El Sistema Vial Arterial está fundamentado en la categorización de las vías y su clasificación de acuerdo en la dinámica territorial, así²:

- **Vías Primarias:** Constituyen las vías continuas que permiten la conexión de la totalidad del territorio metropolitano y municipal, y su articulación con los circuitos regionales y nacionales.
- **Vías Secundarias:** Las conforman los ejes viales que alimentan zonas urbanas y permiten la conexión con las vías metropolitanas primarias. A su vez, estas vías se caracterizan por su función de estructuración de las actividades intraurbanas y están también orientadas a canalizar el tráfico vehicular rápido.
- **Vías Terciarias:** Son aquellas que permiten articular vías primarias o secundarias y que por su extensión o nivel de servicio son complementarias a de estas. Se caracterizan por su función de polos de atracción de la actividad urbana y están orientadas a canalizar el tráfico urbano lento, público y privado.

La red local es la conformada por las vías construidas por los urbanizadores y cedidas gratuitamente al municipio o al AMB, como un elemento vial que se integra y da continuidad a la malla vial existente.

Son de competencia municipal y no presentan influencia metropolitana. La Red Local de vías se subdivide en dos niveles:

- **Nivel 1:** Caracterizadas por su función de penetración a los sectores residenciales, orientados a canalizar el flujo vehicular público y privado.
- **Nivel 2:** Caracterizadas por su función de servicio interno de las aéreas residenciales y comerciales, orientadas a canalizar principalmente los flujos peatonales hacia los sectores de mayor actividad.

² Estudios previos para la formulación de plan maestro de movilidad urbana para el municipio de Bucaramanga - UIS, 2009.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de la clasificación y división de la red vial de la Ciudad; porcentajes relativos a los 544,1 Km/calzada de red vehicular.

Tabla 1. Definición red vial

Clasificación POT	Tipo de vía POT	Porcentaje
Red arterial	Primaria	4.69%
	Secundaria	8.05%
	Terciaria	4.91%
Red Local	Red Local 1	5.25%
	Red Local 2	2.38%
Regional		1.77%
Restante red vehicular		72.96%
Total		100.0%

Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS

Con el interés de estructurar e identificar los tramos que conforman la red vial de la Ciudad, el Municipio de Bucaramanga adoptó el estándar de nomenclatura presentado en la siguiente tabla:

Tabla 2. Longitud de vías de acuerdo a su configuración

Tipo	Longitud (Km-Corredor)	Porcentaje
Autopistas	8.4	1.3%
Avenida	14.6	2.3%
Carretera	2.5	0.4%
Via	14.6	2.3%
Diagonal	5.9	0.9%
Transversal	8.2	1.3%
Calle	277.6	43.8%
Carrera	265.8	41.9%
Callejuela	1.1	0.2%
Pasaje	0.3	0.0%
Bulevar	2.9	0.5%
Otras	31.9	5.0%
Total	633.8	100.0%

Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS

En esta tabla se puede observar que la malla vial está conformada o clasificada en su mayoría por calles y carreras, las cuales suman 86.74% (543.4 Km/corredor), lo

que se podría entender como un configuración vial escasa en cuanto a corredores rápidos que sirvan como reguladores del flujo vehicular. Como podría ser el caso de las autopistas y avenidas que tan sólo suman 3.6% (23.0 Km/corredor).

A partir de la información presentada anteriormente, la cual corresponde a la clasificación y conceptos básicos referentes a la red vial de la Ciudad, es conveniente presentar las características que presentan tales corredores viales, como son: número de calzadas, número de carriles y anchos de calzadas para cada corredor vial, e igualmente, presentar las características en cuanto a capacidad de las vías; información recopilada y extraída del documento “**Estudios previos para la formulación de plan maestro de movilidad urbana para el municipio de Bucaramanga**”, realizado por la UIS.

4.1.1 Clasificación de la malla vial de acuerdo a número de calzadas y carriles

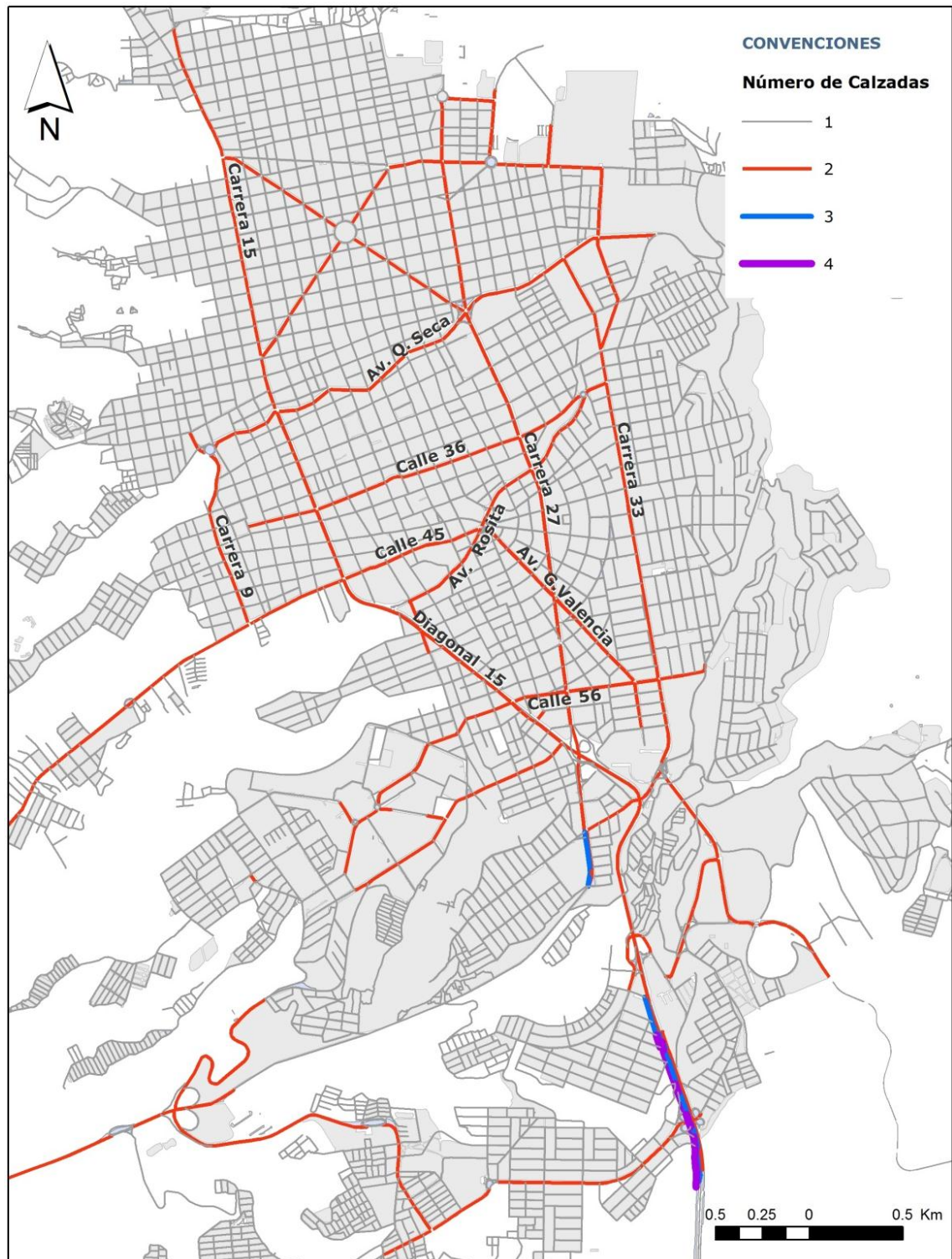
De acuerdo al número de carriles la malla vial presenta 81,62% de corredores viales de una calzada, 17,49% de doble calzada, 0,28% de tres calzadas y tan sólo 0,61% presenta cuatro calzadas y se encuentran en las afueras de la ciudad. A continuación, se presentan tabulados los datos que corresponden al número de carriles, así como, un mapa esquemático en el cual se muestra la clasificación de los corredores viales de acuerdo a esta característica:

Tabla 3. Estadística de la malla vial de acuerdo al número de carriles

Número de carriles	Una calzada	Dos calzadas	Tres calzadas	Cuatro calzadas
2	81,62%	14,47%	0,15%	0,31%
3	0,00%	3,02%	0,13%	0,30%
Total	81,62%	17,49%	0,28%	0,61%

Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS

Figura 3. Clasificación vial de acuerdo al número de calzadas



Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS, figura modificada

4.1.2 Clasificación de la malla vial por sentidos viales

De acuerdo a la clasificación de la malla vial por sentidos viales en la Ciudad se presenta que 51,8% es doble sentido, 26,2% presenta un sólo sentido vial y el restante 22,2% corresponde a la red de vías peatonales, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Estadísticas de la malla vial de acuerdo a los sentidos viales

Sentidos viales	Longitud (Km/corredor)	Porcentaje
Doble sentido	328,7	51,8%
Sentido sencillo	165,8	26,2%
Peatonales	139,3	22,0%
Total	633,8	100,0%

Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS

4.1.3 Clasificación de corredores viales por anchos de calzadas vehiculares

Una de las características más importantes de un corredor vial, tiene que ver con las dimensiones de esta, sobre todo cuando se trata de las dimensiones transversales que son las que determinan la capacidad del corredor vial.

Para la Ciudad se ha realizado la clasificación de anchos de calzada en cuatro intervalos, en los cuales se presenta que 37,0% corresponde a corredores viales con ancho de calzada menores a 6.4 metros, 45,0% tiene entre 6,4 y 9,3 metros, lo cual, corresponde a calzadas con dos y tres carriles.

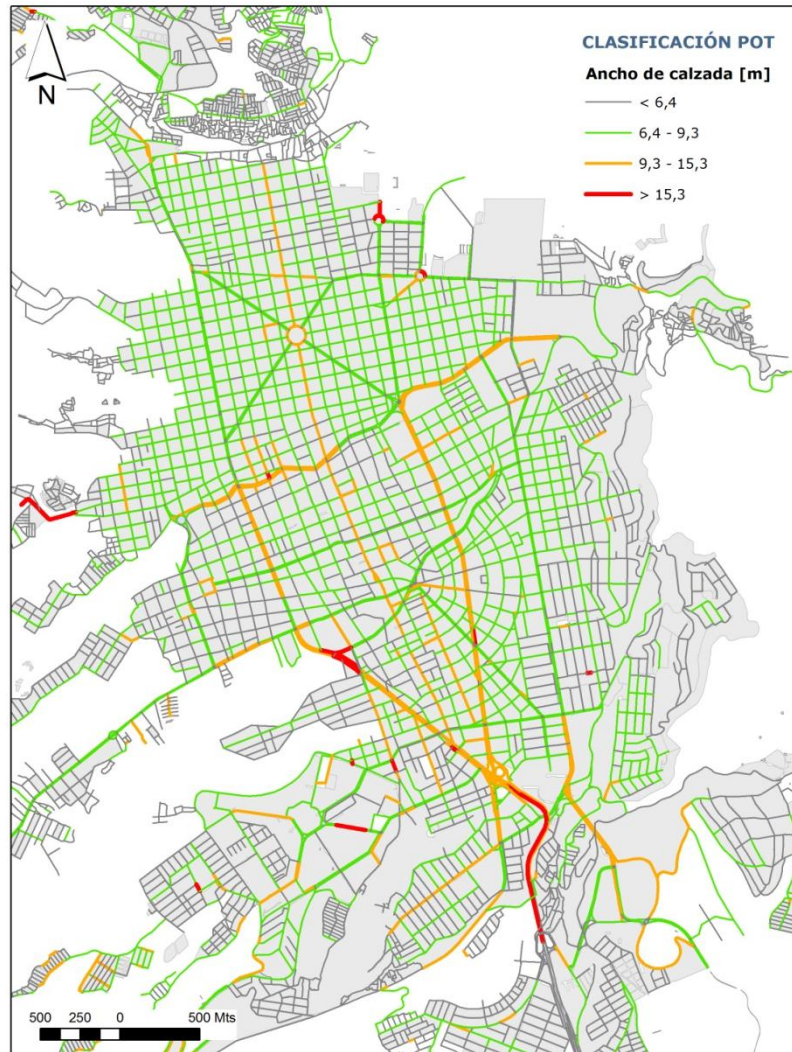
El resumen de esta clasificación se presenta a continuación junto con un mapa de la malla vial de la Ciudad donde se espacializa esta información:

Tabla 5. Estadística de la malla vial de acuerdo a los anchos de calzadas

Anchos de calzada	Km-calzada	Porcentaje
<6,4	201,4	37%
6,4-9,3	244,9	45%
9,3-15,3	70,8	13%
>15,3	27,2	5%
Total	544,3	100%

Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS

Figura 4. Clasificación vial de acuerdo a los anchos de calzada



Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS, figura modificada

Tener en cuenta los aspectos geométricos de la infraestructura vial es de suma importancia en el sentido en que permite determinar la capacidad de esta, sin embargo, es igualmente necesario y de gran relevancia considerar el cómo está compuesta la vía, es decir, qué tipo de pavimento se presenta en cada corredor y en qué estado se encuentra.

En la siguiente tabla se presenta la clasificación de la malla vía de acuerdo al tipo de pavimento existente:

Tabla 6. Pavimentos existentes en Bucaramanga

Tipo de pavimeto	Area (m2)	Porcentaje (%)
Flexible	3.300.994,23	92%
Rigido	193.845,82	5%
Adoquin	12.888,86	0%
Afirmado	79.272,90	2%
Total	3.587.001,81	100%

Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS

Igualmente, a continuación se presenta el estado de los pavimentos de acuerdo a la clase de red; y se presenta en el mapa de la malla vial en qué sectores se presenta cada una de estas características:

Tabla 7. Estado de pavimento por clase de red

ESTADO	PRIMARIA		SECUNDARIA		TERCIARIA		TOTALES (m2)
	AREA (m2)	%	AREA (m2)	%	AREA (m2)	%	
BUENO	104,236.44	13.59%	266,178.24	19.36%	224,331.49	19.03%	594,746.17
ACEPTABLE	437,741.50	57.06%	670,682.16	48.77%	593,916.22	50.39%	1,702,339.88
REGULAR	183,173.03	23.88%	346,463.30	25.20%	167,704.95	14.40%	697,341.28
MALO	41,944.88	5.47%	91,787.40	6.67%	190,746.53	16.18%	324,478.81
NO APLICA							
TOTAL	767,095.85	100%	1,375,111.10	100%	1,176,699.19	100%	3,318,906.14

Fuente: Diagnostico de Movilidad UIS

4.2 Control semafórico

Según el Plan Maestro de Movilidad, el sistema de regulación semafórico de Bucaramanga, está actualmente conformado por 172 intersecciones con semáforos, controlados por 117 equipos de control ubicados en ellas, lo cual, significa que existen conjuntos de dos, tres y cuatro intersecciones contiguas que son controladas por un equipo de control. Todas estas intersecciones reguladas con semáforos se encuentran distribuidas en toda la ciudad sobre las vías principales y en menor proporción sobre las vías locales. Sin embargo, es el sector centro el que presenta una mayor presencia de ellas, con aproximadamente 30% del total.

A continuación, se presenta el listado y la ubicación de las intersecciones con semáforo en la ciudad de Bucaramanga:

Tabla 8. Ubicación de intersecciones con semáforo

ID	DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
1	CRA. 14 CALLES 36 Y 37	2	GE
2	CRA. 15 CALLE 21 Y 22	2	MP
3	CRA. 15 BOULEVAR SANTANDER	1	C 800
4	CRA. 15 AV. QUEBRADA SECA	1	GE
5	CRA. 15 CALLE 33	1	MP
6	CRA. 15 CALLE 34	1	MP
7	CRA. 15 CALLE 3	1	GE
8	CRA. 15 CALLE 36	1	C 800
9	CRA. 17C CALLES 55 Y 56	2	GE
10	CRA. 15 CALLE 41	1	C 800
11	CRA. 15 CALLE 42	1	C 800
12	CRA. 15 CALLE 45	1	C 800
13	CRA. 15 CALLE 6	1	MP
14	DIAG. 15 Y CRA. 17 AV. ROSITA	2	GE
15	CRA. 15 CALLE 15	1	MP
16	CRA. 17 CALLES 36 Y 37	2	GE

ID	DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
17	CRA. 18 AV. QUEBRADA SECA	1	MP
18	CRAS. 21 Y 22 CALLE 31	2	MP
19	CRA. 18 CALLES 33 Y 34	2	GE
20	CRAS. 17, 18 Y 19 CALLE 35	3	MR
21	CRA .18 CALLE 36	1	GE
22	CRA. 19 AV. QUEBRADA SECA	1	GE
23	CRA. 20 AV. QUEBRADA SECA	1	GE
24	CRA. 19 CALLES 33 Y 34	2	GE
25	CRAS. 18 Y 19 CALLE 37	2	MP
26	CRA. 21 CALLE 33	1	AU
27	CRA. 21 CALLES 34 Y 35	2	GE
28	CRA. 21 CALLES 36 Y 37	2	GE
29	CRAS. 21 Y 22 AV. ROSITA	2	GE
30	DIAG. 15 CALLE 55	1	C 800
31	DIAG. 15 CALLE 56	1	C 800
32	CRAS. 21 Y 22 AV. QUEBRADA SECA	2	GE
33	CRA. 22 CALLE 33	1	AU
34	CRA. 22 CALLE 34	1	AU
35	CRA. 22 CALLE 35	1	AU
36	CRA. 22 CALLES 36 Y 37	2	GE
37	CRA. 30 CALLE 67	1	GE
38	CRA. 23 AV. ROSITA	1	MP
39	CRA. 27 CALLES 32 Y 33	2	MR
40	CRA. 27 CALLE 34	1	GE
41	CRA. 27 CALLE 35	1	GE
42	CRA. 27 CALLE 36	1	GE
43	CRA. 27 AV. ROSITA Y CALLE 41	2	GE
44	CRA. 27 CALLE 45	1	GE
45	CRA. 27 CALLE 48	1	GE
46	CRA. 27 AV. GONZÁLEZ VALENCIA	1	GE
47	CRA. 27 CALLE 54	1	GE
48	CRAS. 27 Y 28 CALLE 56	2	MP
49	CRA. 27 CALLE 67	1	MP
50	CRA. 33 AV. QUEBRADA SECA	1	MP
51	CRA. 33 CALLE 32	1	MP
52	CRA. 33 CALLE 34	1	MP

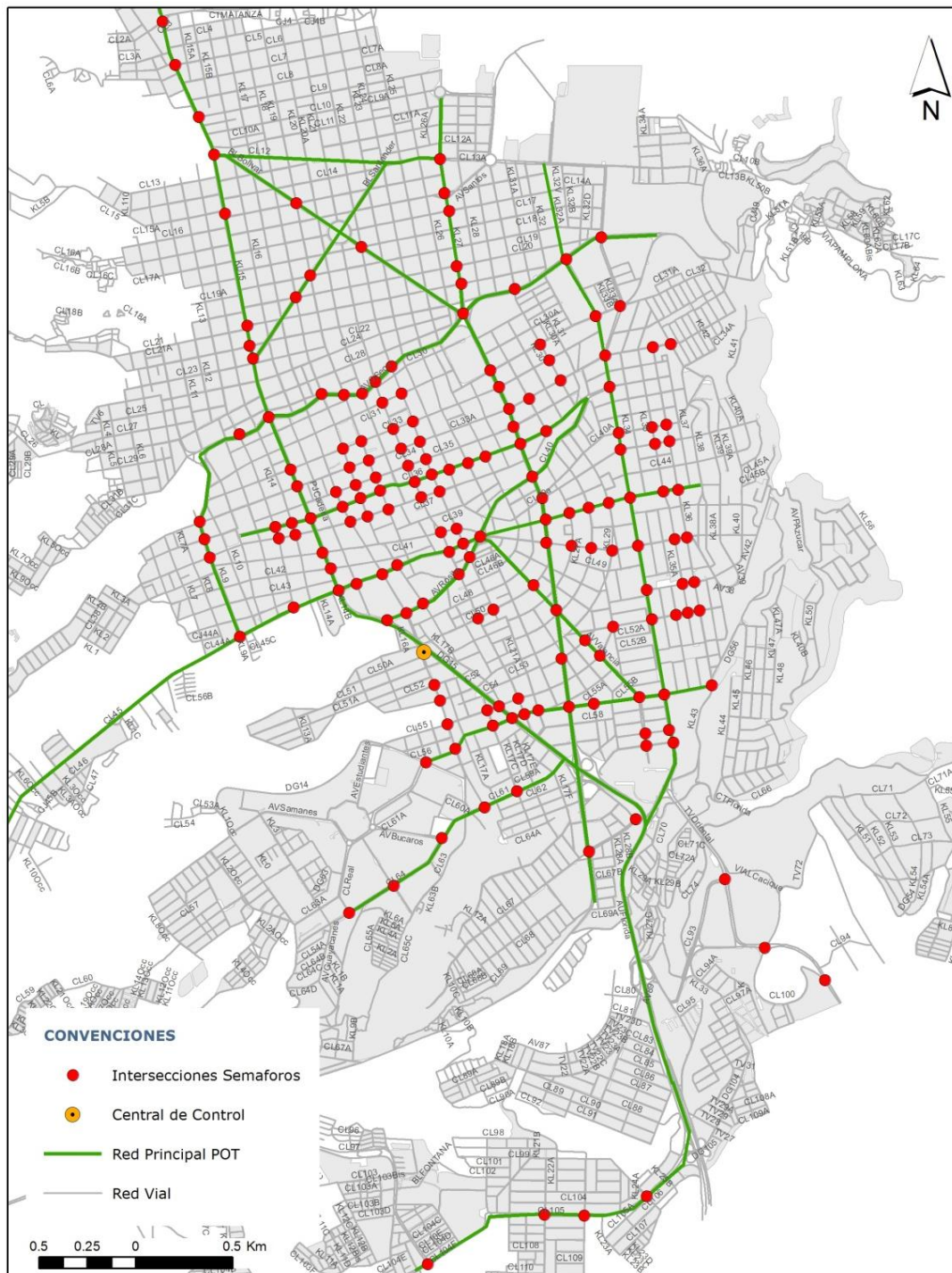
ID	DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
53	CRA. 33 CALLE 36	1	MP
54	CRA. 33 CALLES 41 Y 42	2	MR
55	CRA. 33 CALLE 45	1	MP
56	CRA. 33 CALLE 48	1	MP
57	CRA. 33 CALLES 51 Y 52	2	MP
58	CRA. 33 CALLE 56	1	MP
59	CRA. 19 CALLE 36	1	GE
60	CRA. 15 CALLE 12 (BOULEVARD BOLIVAR)	1	C 800
61	CRA. 18 CALLE 20 (BOULEVARD SANTANDER)	1	MP
62	CRA. 17 CALLE 55	1	MP
63	CRA. 19 BOULEVARD BOLÍVAR	1	MP
64	CRA. 19 BOULEVARD SANTANDER	1	GE
65	CRA. 22 BOULEVARD BOLIVAR	1	MP
66	CRAS. 21 Y 22 CALLE 41	2	MP
67	CRA. 27 CALLE 14	1	MP
68	CRA. 27 AV. QUEBRADA SECA	1	MP
69	CRA. 32 (AV. G. VALENCIA) CALLE 56	1	MP
70	CRA. 33A AV. QUEBRADA SECA	1	GE
71	CRA. 30 AV. QUEBRADA SECA	1	MP
72	CRAS. 21 Y 22 CALLE 50	2	MP
73	CRA. 28 CALLE 34	1	MP
74	CRA. 28 CALLE 36	1	GE
75	CRA. 33A CALLE 32	1	MP
76	CRAS. 15 Y 17 CALLE 56	2	GE
77	CRAS. 21 Y 22 CALLE 56	2	GE
78	CRAS. 35A Y 36 CALLE 48	2	MP
79	CRAS. 35A Y 36 CALLE 45	2	MP
80	CRAS. 27A, 28 Y 29 CALLE 48	3	MP
81	CRAS. 35, 35A Y 36 CALLE 52	3	MP
82	CRAS. 17 Y 17C CALLE 61	2	MP
83	CRA. 17 CALLES 52 Y 53	2	MP
84	CRA. 18 AV. ROSITA	1	MP
85	CRA. 16 CALLE 45	1	MP
86	CRAS. 17 Y 18 CALLE 45	2	MP
87	CRA. 9 CALLE 45	1	GE
88	CRA. 9 CALLE 37	1	MP

ID	DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
89	CRA. 9 CALLES 34 Y 35	2	MP
90	CRA. 13 AV. QUEBRADA SECA	1	MP
91	CRA. 13 CALLES 36 Y 37	2	MP
92	CRA. 15 CALLE 9	1	MP
93	CRAS. 21 Y 22 CALLE 45	2	GE
94	CRA. 33 CALLES 62 Y 63	2	MP
95	CRA. 33 PERIMETRAL ORIENTAL LA FLORA	1	MP
96	CRA. 36 CALLE 56	1	MP
97	AV. GONZÁLEZ VALENCIA CALLES 54 Y 55	2	MP
98	CRA. 30 CALLES 32, 33 Y 34	3	MR
99	CRAS. 27A, 28 Y 29 CALLE 45	3	MP
100	POLICLÍNICA TORCOROMA	1	MP
101	AV. GONZÁLEZ VALENCIA CALLES 62 Y 63	2	MR
102	CRAS. 35A Y 36 CALLE 51	2	MR
103	AV. GONZÁLEZ VALENCIA CALLE 50	1	MP
104	CRA. 13 CALLE 45	1	GE
105	CRA. 27 CALLES 20 Y 21	2	MR
106	CRAS. 36 Y 38 CALLE 34	2	MP
107	CRAS. 35 Y 36 CALLES 41 Y 42	4	MR
108	CRA. 31 CALLE 52	1	GE
109	CRA. 21 CALLE 55	1	GE
110	CRAS. 23, 24 Y 25 CALLE 36	3	MR
111	TV. ORIENTAL COL. CALDAS Y STA. BARBARA	1	MR
112	CRA. 8 CALLE 64	1	C 800
113	CRA. 5 CALLE 64	1	GE
114	CRA. 25 CALLE 105 (PROVENZA)	1	MP
115	CRAS. 22 Y 23 CALLE 105 (PROVENZA)	2	MP
116	CRA. 16 CALLE 105 (ROCÍO)	1	MP
117	CRA. 27 CALLES 16 Y 17	2	MP

Fuente: Inventario Dirección de Tránsito de Bucaramanga

En la siguiente figura se ubican espacialmente las intersecciones, en donde se observa la concentración de intersecciones con semáforo en la zona central de la Ciudad y la dispersión existente en vías secundarias.

Figura 5. Ubicación de las intersecciones con semáforo



Fuente: Elaboración propia con base en información suministrada por la Subdirección Técnica de Tránsito de Bucaramanga

El sistema está conformado básicamente por la central de control, los equipos localizados en campo (intersecciones con semáforo) y el mobiliario semaforico. La comunicación entre la central y los equipos se realiza mediante impulsos que son conducidos por cableado tipo telefónico. A continuación, se describen los elementos del sistema y sus condiciones de operación actual. Información tomada del Plan Maestro de Movilidad, UIS, 2009.

4.2.1 Red de comunicaciones de datos

El sistema opera como un conjunto intercomunicado con la central de operación mediante cable tipo telefónico de 3 y 5 pares. Actualmente, el sistema está comunicado 98% con los equipos de campo, ya que las intersecciones con semáforo ubicadas en el sector de Provenza se encuentran fuera del alcance de la conexión central, por lo que su programación se realiza directamente en el equipo (programación local).

4.2.2 Central de control

La central de control tiene alcance en un radio de 7 km.; las conexiones con los equipos en campo se realizan con cableado subterráneo tipo telefónico de 5 pares.

Está constituida por un sistema de cableado a tierra para protección de los equipos, regletas convertidoras de señales que transforman la información del computador a los equipos en campo y viceversa, 2 UPS que protegen y suministran energía al sistema en caso de una variación abrupta e imprevista, tablero con luces LED donde están ubicadas espacialmente las intersecciones con semáforo de la Ciudad, un computador central de tráfico SICOMP M56 “Siemens”, con módulos de interface SAS y EPS, que permiten la manipulación de las señales lógicas, impresoras, teclados y monitores para visualización y manipulación del computador de tráfico.

Las UPS existentes tienen 25 y 15 años de uso. Actualmente, las dos se encuentran en funcionamiento, la UPS de 25 años funciona con baterías de ácido y plomo 8D (Tipo vehículo) de 6 módulos, que se encuentran conectadas entre sí para aumentar el voltaje, y la de 15 años, con suministro de energía convencional. El computador de tráfico tiene tres dispositivos de salida de información: el tablero que tiene el mapa de la Ciudad de Bucaramanga con los principales corredores viales e intersecciones con semáforo localizadas, que permite visualizar el estado de funcionamiento de la red semafórica, y es el primer lugar en la central donde se observan las intersecciones que se encuentran en falla; el otro es el monitor que permite la visualización del software de programación y la información existente de la red semafórica, y, por último, la impresora, que registra cada movimiento realizado en el sistema en tiempo real y en forma continua.

Este computador de tráfico tiene capacidad para almacenar la programación de 400 equipos, aunque en la actualidad los módulos de interface se encuentran trabajando con toda su capacidad y no permite la conexión de más equipos. La tecnología existente permite la ampliación del sistema mediante la adquisición de módulos adicionales. La memoria actual del computador permite el almacenamiento de los datos diarios registrados de los 117 equipos; a medida que este registro va siendo guardado en el computador, se imprime, también; de ese modo, queda un registro físico que se archiva. La central de control (todos sus componentes) permanece a una temperatura regulada de 19°C para evitar el deterioro por dilataciones y humedad que se pueden generar debido a la temperatura ambiente de la Ciudad.

4.2.3 Equipos de control

En Bucaramanga, el sistema de semáforos cuenta con cuatro tipos de equipos, llamados AU, GE, MP, MR y C800, de generaciones distintas y características físicas y de operación que difieren entre sí. En la siguiente tabla se describen los equipos:

Tabla 9. Caracterización de los equipos de semáforos actuales

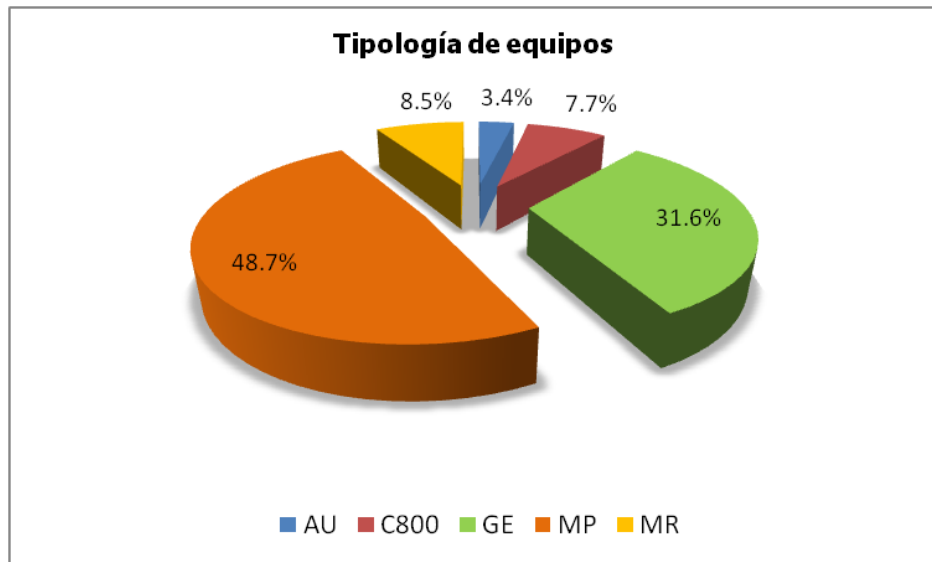
EQUIPO	EDAD	CARACTERÍSTICAS
AU	>35 años	Equipo mecánico
		No permite la conmutación de planes
		Permite programación para cuatro grupos
		Si pierde comunicación con la central queda en plan fijo
		Protocolo cerrado
GE	35 años	Equipo mecánico
		Equipo tipo BEFA 8
		Comunicación con cableado de tres pares
		Tarjeta con diodos o tornillos
		Permite programación de once grupos
		Si pierde comunicación con la central queda en plan fijo
		Protocolo cerrado
MP	20 años	Equipo semiautomático
		Equipo tipo BEFA 8
		Comunicación con cableado de tres pares
		Permite 3 estructuras de programación
		Permite programación para dieciséis grupos
		Si pierde comunicación con la central queda en plan fijo
		Protocolo cerrado
MR	15 años	Equipo automático
		Equipo tipo BEFA 15 (nueva generación)
		Comunicación con cableado de un par
		Emisión de datos "on-line" o en tiempo real
		No requiere de planeamiento en el equipo. Puede realizarse desde la central
		Si pierde comunicación con la central, entra a funcionar el automático interno que conmuta los planes en forma programada

EQUIPO	EDAD	CARACTERÍSTICAS
		Permite programación de 24 grupos, con ampliación hasta de 32
C 800	2 – 10 años	Equipo automático
		Equipo tipo BEFA 15 (nueva generación)
		Comunicación con cableado de un par
		Emisión de datos “on-line” o en tiempo real
		No requiere de planeamiento en el equipo. Puede realizarse desde la central
		Si pierde comunicación con la central, entra a funcionar el automático interno que conmuta los planes en forma programada
		Permite programación de 32 grupos

Fuente: Dirección de Tránsito de Bucaramanga

Actualmente en la ciudad de Bucaramanga, de los 117 equipos que se encuentran actualmente instalados en las 172 intersecciones con semáforo que tiene el sistema semafórico, 84% son equipos BEFA 8 y 16% BEFA 15, como se muestra en la siguiente figura.

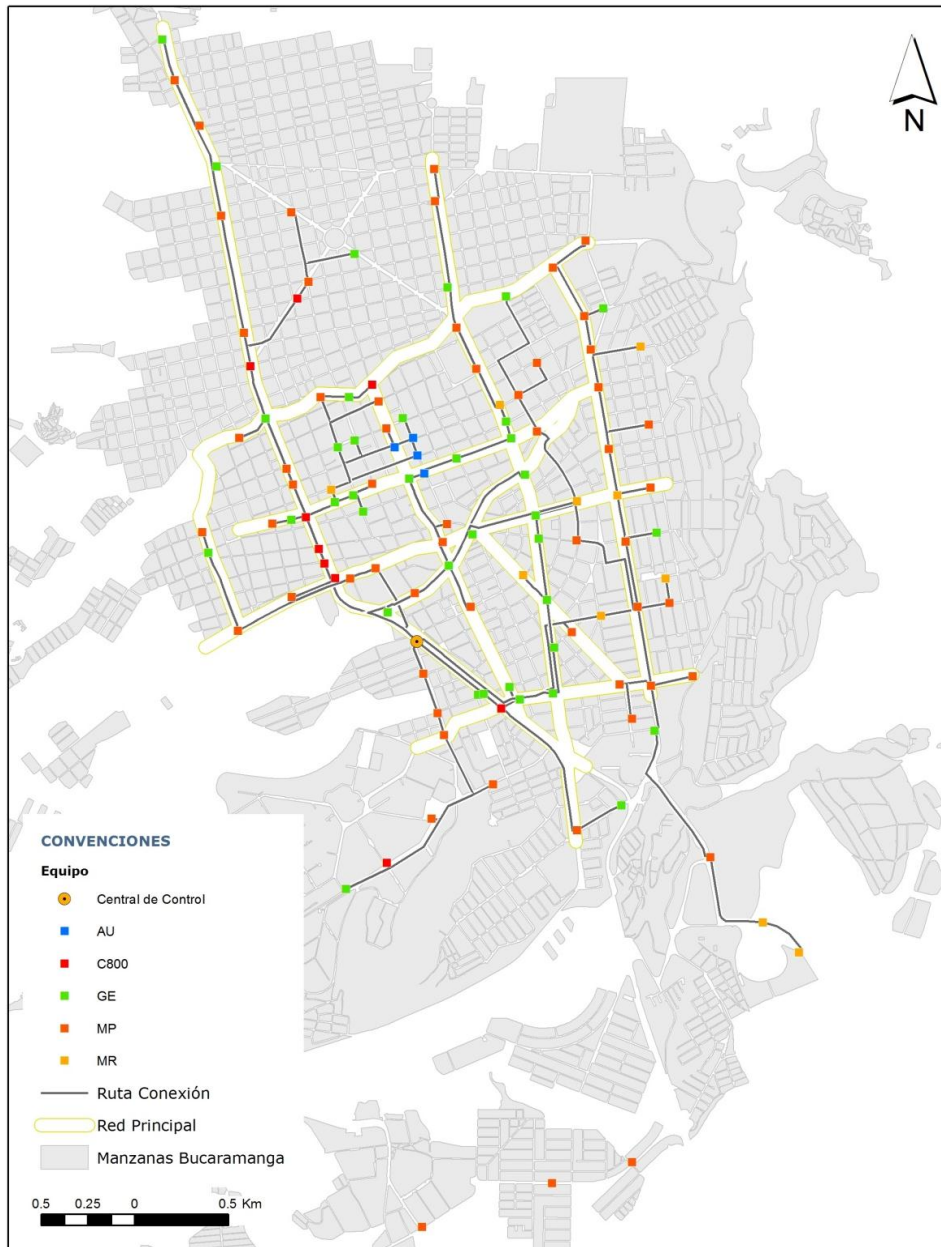
Figura 6. Tipología de equipos instalados en el sistema semafórico actual



Fuente: Dirección de Tránsito de Bucaramanga

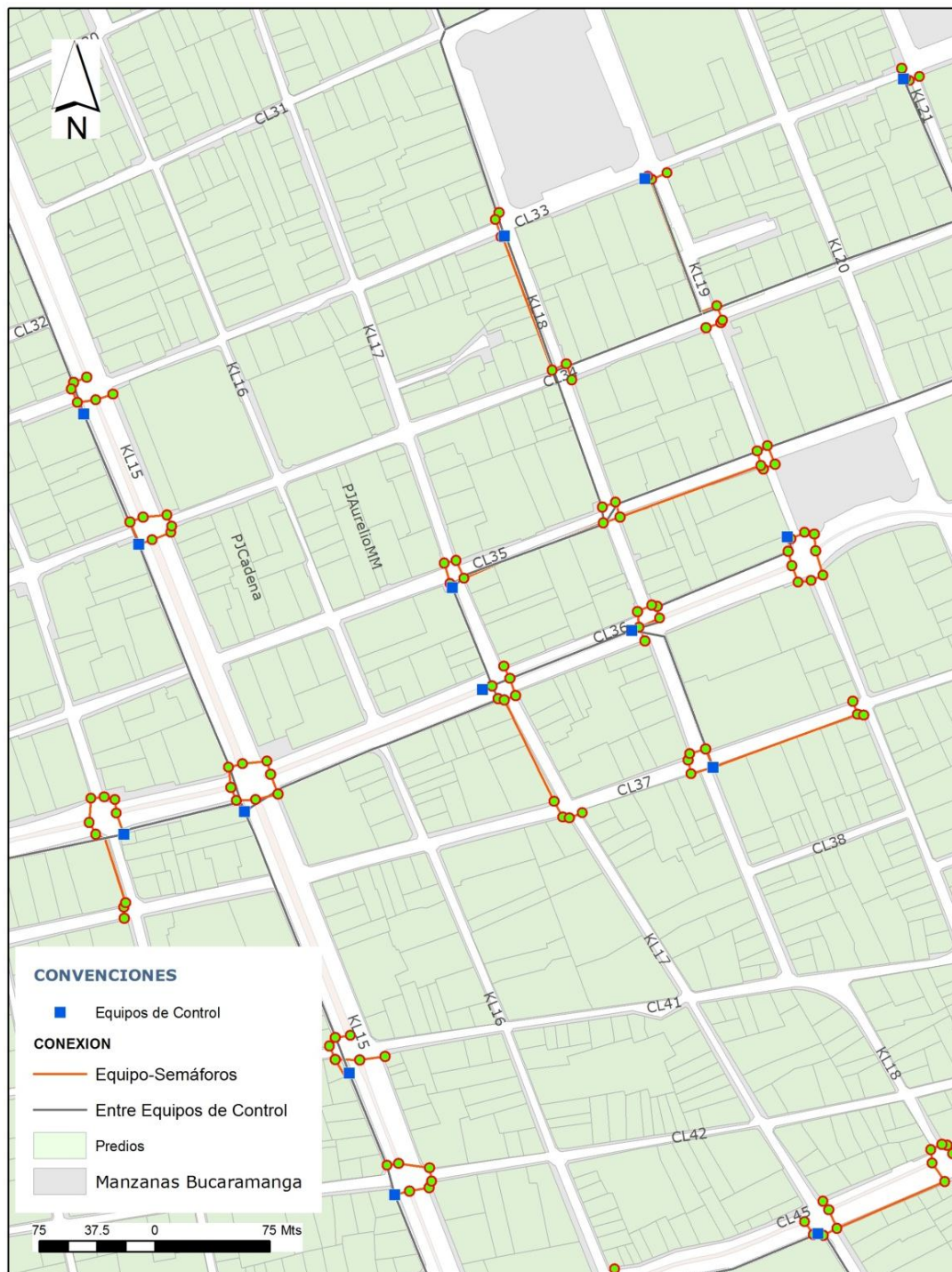
En las siguientes figuras se presenta la conexión actual que tiene la red semafórica de la Ciudad, el tipo y la distribución de los equipos de control. Así como, un detalle de la conexión entre los equipos de control y los semáforos.

Figura 7. Esquema general de la conexión actual de los equipos de control



Fuente: Elaboración propia con base en información suministrada por la Subdirección Técnica de Tránsito de Bucaramanga

Figura 8. Detalle conexión actual Equipos de Control - Semáforos



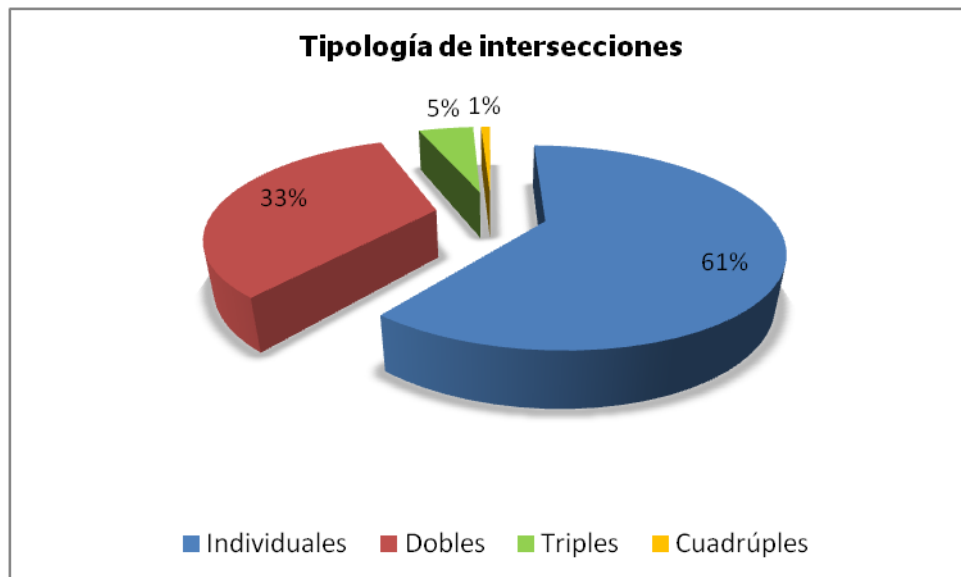
Fuente: Elaboración propia con base en información suministrada por la Subdirección Técnica de Tránsito de Bucaramanga

El hecho de que la red semafórica de la Ciudad presente grupos de 2, 3 y 4 intersecciones coordinadas por el mismo equipo de control, representa ventajas de tipo económico, ya que se reduce el número de equipos a utilizar. Sin embargo, las desventajas que se presentan están representadas en funcionalidad, esto en el sentido de que las intersecciones al ser controladas por un mismo equipo, la programación de los semáforos no permite crear planes independientes de fases, (no hay desfases entre intersecciones), lo cual, influye en la continuidad de los flujos vehiculares, al no permitir la programación de olas de verde.

Igualmente, la gestión de varias intersecciones por un mismo equipo de control, resulta inadecuada cuando se presenta fallas en el sistema o daños en las redes de conexión; esta situación saca de servicio al mismo tiempo a todo el grupo de intersecciones, lo cual afecta directamente la movilidad.

Según el Plan de Movilidad, en la Ciudad se presentan 61% de intersecciones individuales, tal como se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 9. Intersecciones controladas por el mismo equipo



Fuente: Dirección de Tránsito de Bucaramanga

A pesar de que se presenten agrupaciones de intersecciones, es importante resaltar las ventajas de la interacción equipos de control-central de control, debido a que ello facilita la programación de manera conjunta, creando planes semafóricos y monitoreo constante. Sin embargo, la coordinación y programación de estos planes se realiza sobre intersecciones con un control de tiempo fijo, lo cual, significa que se asegura un monitoreo del estado de los dispositivos, ya que los equipo envían información sobre fallas, pero, no información de las condiciones actuales del tráfico; esta revisión de la condición del trafico debe ser efectuada en el sitio y posteriormente actualizada en la central de control. No obstante, se pueden almacenar planes para situaciones especiales previstas como prioridad de flujos, contraflujos, ciclo vías, entre otros.

Como ya se mencionó anteriormente, los equipos existentes presentan diferencias en cuanto a edad, esta situación se ha manejado asignándoles prioridad, es decir, los semáforos más actuales se encuentran en la zona central de la Ciudad y sobre los corredores principales donde los flujos son fuertes; mientras que los más antiguos se encuentran ubicados en la periferia, en intersecciones que no requieren complejos planes de operación.

Ya considerados los temas básicos de infraestructura vial y control semafórico (oferta), y presentadas sus características, con sus ventajas y desventajas; es necesario realizar una breve descripción de la movilidad en la Ciudad (demanda).

5 ASPECTOS GENERALES DE LA MOVILIDAD EN BUCARAMANGA.

La consideración de los temas referentes a la infraestructura de los medios de transporte y sus características actuales en una ciudad, es un paso indispensable en establecer estrategias que permitan mejorar las condiciones problemas o deficiencias que la oferta del transporte presenta. No obstante, es igualmente importante e indispensable, la consideración de la dinámica en cuanto a movilidad que presenta la Ciudad; reflejo de la actividad económica y social que desarrolla esta. En este sentido, es necesario presentar las características de la movilidad actual de la Ciudad y algunos indicadores y esquemas que reflejan mejor la situación.

Actualmente, y de acuerdo al Plan Maestro de Movilidad, la congestión es el principal problema percibido por los ciudadanos de la ciudad de Bucaramanga, debido a los altos volúmenes vehiculares dirigidos desde los municipios que conforman el Área Metropolitana, Girón, Floridablanca y Piedecuesta; que agravan el ya complicado tema de la oferta de infraestructura vial. Esto justificado al hecho de que la oferta laboral se encuentra concentrada en Bucaramanga, por lo que según cifras del Ministerio de Transporte (2010), el número de vehículos particulares registrados en 2009 en el Área Metropolitana fue de 83.962 autos y 129.582 motocicletas; de los cuales, 74.0% de los autos y 7.1% de las motos están registradas en Bucaramanga.

Otro aspecto importante a considerar es el crecimiento poblacional que por problemas de espacio, deber ser densificados en la periferia y otros sectores de la Ciudad. Esta situación crea la necesidad de movilizar más eficientemente a las personas a través de sistemas óptimos de transporte público que desestimulen la utilización de medios de transporte particulares.

La siguiente figura presenta la distribución de las rutas de transporte público en la Ciudad. A pesar de que existe una considerable cantidad de rutas de buses (62 en total), algunos sectores de la Ciudad se presentan saturados y otros presentan escasas de rutas, esto debido a diferentes motivos; sin embargo, son situaciones que promueven el uso de medios de transporte privado para movilizarse.

Figura 10. Distribución de rutas de transporte público en Bucaramanga

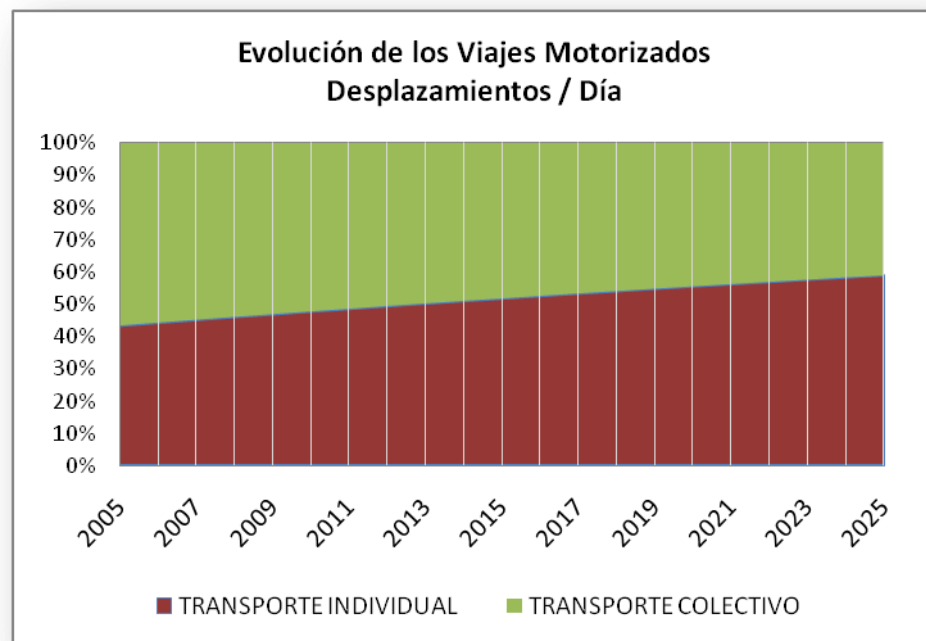


Fuente: Elaboración propia basada en datos del Plan de Movilidad de Bucaramanga

Para hacer frente a los problemas de transporte público, en la Ciudad se instaló un sistema de transporte masivo llamado “Metrolínea”, que tiene como objeto mejorar la accesibilidad de los usuarios, así como, disminuir la cantidad de emisiones, reducir costos de operación y los niveles de accidentalidad. El sistema cuenta con carriles exclusivos y se desplaza igualmente por carriles mixtos. Este sistema de transporte pretende abarcar 66% de los viajes que se presentan en la Ciudad de manera progresiva incluyendo al sistema a los municipios que conforman el área metropolitana.

Estudios presentados en el Plan Maestro de Movilidad, presentan la siguiente figura en la cual se ve reflejado el aumento progresivo del uso del transporte privado en comparación con el sistema de transporte público.

Figura 11. Evolución de los viajes motorizados 2005-2025



Fuente: Plan Maestro de Movilidad, UIS 2010

Actualmente, la repartición de viajes se encuentra en 55% de viajes para el transporte público y 45% para el transporte privado; sin embargo, la tendencia presenta una disminución de 1.6% de viajes en el transporte público anualmente. “Esta situación traería por consecuencia una fuerte presión sobre la red vial que sin duda agravaría los problemas de congestión vial, aumentando sus efectos negativos sobre la competitividad de la ciudad y sobre la calidad de vida de sus habitantes”. (Plan Maestro de Movilidad, 2010)

Para cuantificar el tema de la demanda del transporte existen diferentes elementos, uno de ellos es la toma de aforos vehiculares, automáticos y manuales; conteos de usuarios, etc. Mediante estos procesos no se pretende conocer la demanda, sino saber cómo la demanda utiliza cierto sistema vial³. Igualmente, existen otros mecanismos, por ejemplo, encuestas origen destino y encuestas domiciliarias. Sin embargo, estos mecanismos representan grandes costos de ejecución por lo cual esa información es poco asequible.

Una manera de relacionar la infraestructura con demanda vehicular de una vía, es mediante la relación Volumen Capacidad, la cual, según el HCM 2000, la relación v/c es un indicador aproximado de la suficiencia general de la geometría de una intersección. Y aunque no es apropiado asignar un Nivel de Servicio a una intersección en base a v/c , si es apropiado evaluar el estado operacional de la intersección para propósitos rápidos de estimación.

Considerando lo anterior, y utilizando los datos de la simulación vehicular elaborada en el Plan de Movilidad, en el cual, se realizaron estimaciones de la demanda del transporte público y privado y de matrices origen-destino; se presenta en la figura 13 el estado de la malla vial, en base a la relación volumen/capacidad en la Ciudad. Aunque la gráfica supone un comportamiento estable de congestión, se presenta otra situación en campo; caso específico es el

³ MALDONADO, José Luis, Modelos de demanda de transporte y de tráfico.

de la carrera 13; la figura 13 presenta condición por debajo de la capacidad; sin embargo, existe allí problemas de congestión (figura 12), esta situación se presenta debido a que es un corredor vial mayoritariamente de transporte público con bajo nivel de avance, por lo cual los conteos arrojan bajos flujos vehiculares por hora, y a la hora de calcular la relación v/c, se presenta esta condición –por debajo de la capacidad-. Casos similares y de otra índole se presentan en diferentes zonas de la Ciudad.

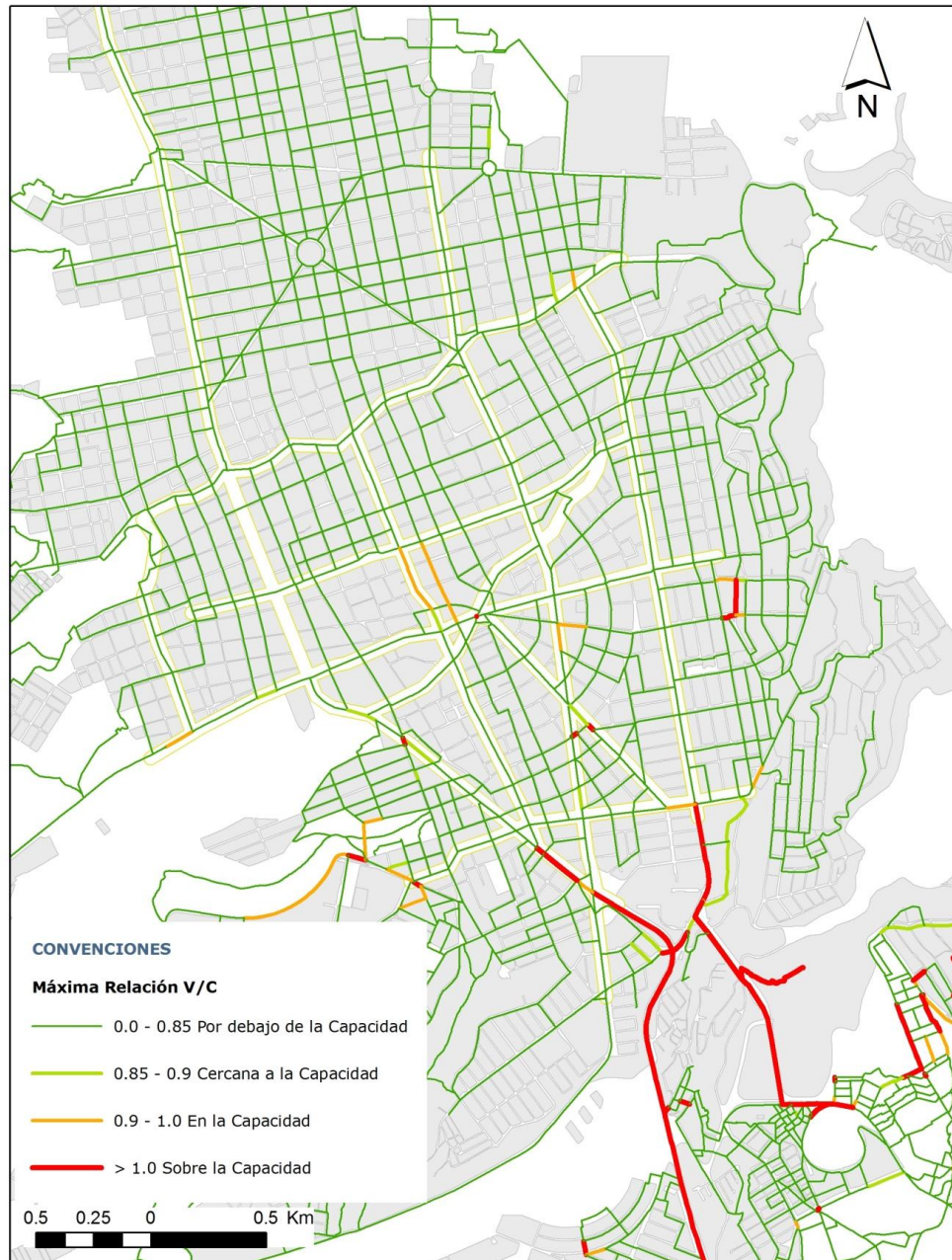
Figura 12. Congestión corredor Carrera 13



Fuente: Diagnostico de Movilidad, UIS 2010

Finalmente, es preciso mencionar la tendencia que presentan los flujos en la Ciudad, esto con el fin de enfocar las estrategias en mejorar la movilidad del transporte en esa dirección. La ciudad presenta un comportamiento longitudinal de desplazamiento en sentido norte-sur y viceversa, presentándose cuatro horas pico, esto correspondiente a motivos de trabajo y estudio en la mañana y tarde, y motivos basados en el hogar al mediodía y noche.

Figura 13. Estado de la malla vial de acuerdo a la relación Volumen/Capacidad⁴



Fuente: Elaboración propia basada en datos del Plan de Movilidad de Bucaramanga

⁴ La clasificación y valores que se presenta en la grafica referente a la relación v/c, ha sido tomada del *Highway Capacity Manual 2000*

6 SELECCIÓN DEL CONTROL Y DISEÑO DE LA RED SEMAFORICA

Los equipos de control corresponden a los dispositivos encargados de organizar, ejecutar y monitorear los planes semafóricos que regulan una intersección semaforizada. Sin embargo, determinar el tipo de control más adecuado para una intersección con semáforos requiere no solo conocer las características del controlador, sino además, y aun más importante, saber las características de la intersección en consideración.

De acuerdo a esto, y para asegurarse con la correcta selección del controlador es necesario recopilar la información que permita reconocer y establecer qué características presenta la intersección y qué ajustes o regulación requiere. Para el presente proyecto se ha presentado una situación que hace un poco más difícil la caracterización de la intersección, debido a la escasa información de casos de estudio y datos concerniente a flujos vehiculares, así como tiempos de semáforos, flujos de saturación, etc.; sin embargo, se cuenta con la información necesaria para la realización del análisis desde un enfoque conceptual.

El tema de control semafórico de tráfico se puede abordar de dos maneras: Una planeación estratégica, la cual, es la implementada en este proyecto; y la planificación operacional. La primera corresponde a plantear posibles soluciones, que tienen como base el fundamento conceptual; la segunda un poco más compleja, corresponde a la manipulación de datos de campo y la elaboración de planes ya con el propósito de ser implementados y evaluados.

Ahora bien, la metodología que se ha de implementar en esta parte del proyecto corresponde a una combinación e interacción de dos fuentes de información, una de datos de campo, los cuales, corresponden a información de estudios anteriores de movilidad⁵; relación Volumen/Capacidad y el mapa de Rutas de Buses en la

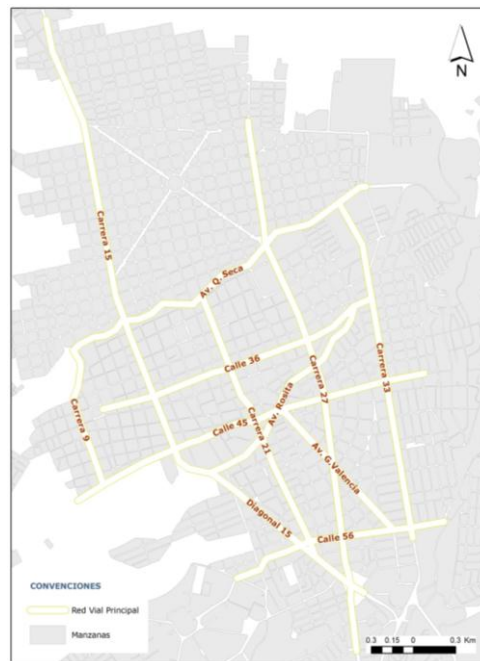
⁵ Plan Maestro de Movilidad, UIS, 2009.

Ciudad; igualmente, toda la información con la que se cuenta de aforos vehiculares; la otra información hace parte de estudios teóricos y conceptuales que diferentes autores han elaborado en torno al tema de controladores de tráfico.

Teniendo en cuenta la limitación a causa de falta de información, fue necesario establecer los límites o alcances del proceso; para salvar esta situación se consideró seleccionar una Red Principal, que fue escogida teniendo en cuenta la clasificación según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), e igualmente, seleccionada a partir de la cantidad de información encontrada.

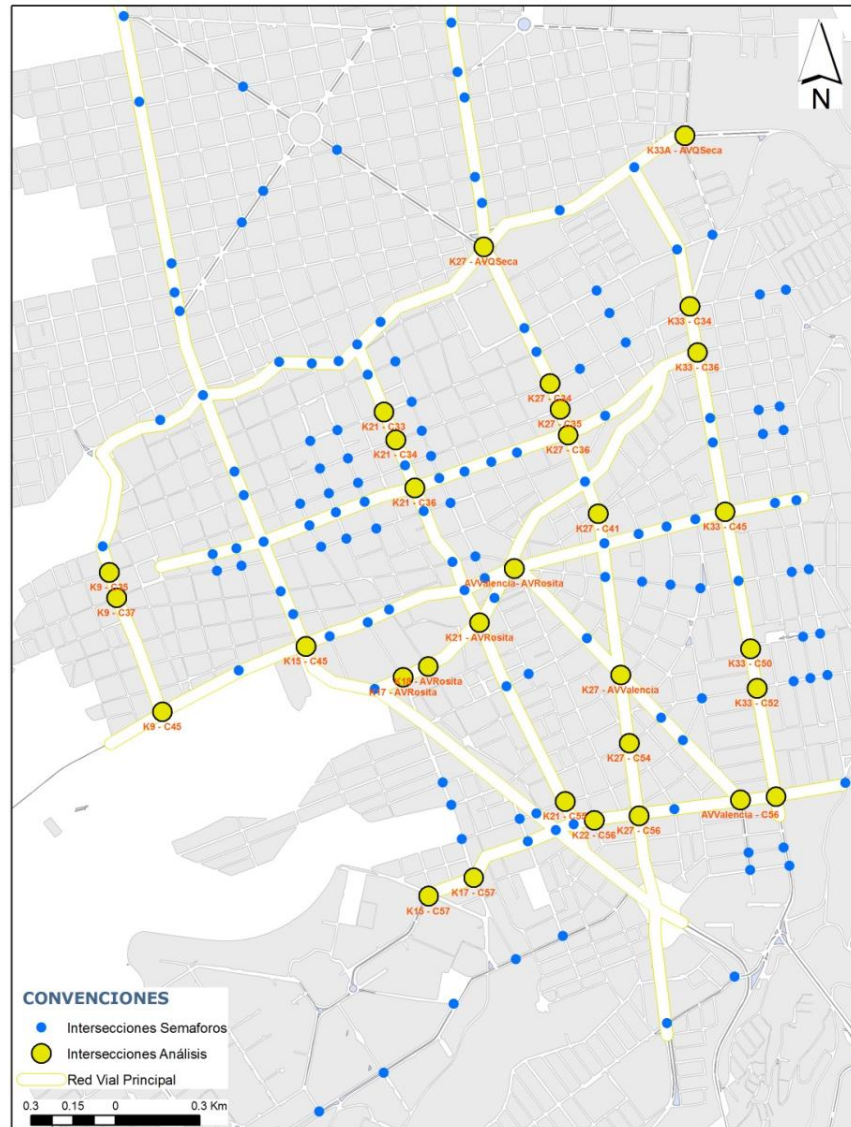
La información considerada para esta selección corresponde a los datos de número de calzadas, flujo vehicular, anchos de calzada y por último, que tuviera intersecciones viales semaforizadas. Toda esta información se encuentra en el diagnóstico de infraestructura y control semafórico, temas anteriormente presentados.

Figura 14. Red Vial Principal considerada



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Intersecciones para el análisis



Fuente: Elaboración propia

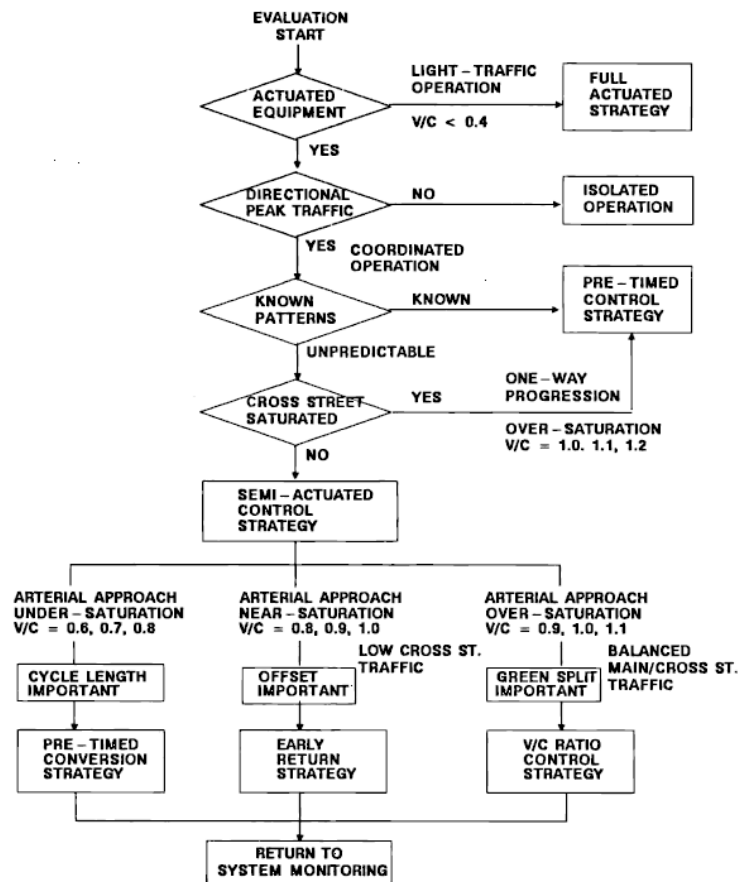
➤ **Análisis de intersecciones**

Para el análisis de la información se tuvo en cuenta la guía que presenta Edmond Chang⁶ para realizar una selección rápida del tipo de estrategia de control que se se

⁶ CHANG, Edmond, *Guidelines for Actuated Controllers in Coordinated Systems*, 1996

puede implementar en una intersección en base a ciertas características básicas fácilmente identificables. La siguiente figura corresponde al diagrama en la guía mencionada.

Figura 17. Guía recomendada para la selección del tipo de control



Fuente: Chang, Edmond, Guidelines for actuated controllers in coordinated systems

El diagrama inicia considerando un control actuado como referencia; si la operación del semáforo presenta una relación v/c menor a 0.4, recomienda una estrategia totalmente actuada; ahora, sí no se cumple la anterior condición se pregunta si el tráfico pico es direccional, generalmente un corredor principal presenta esta característica; sí no se cumple, se recomienda una operación

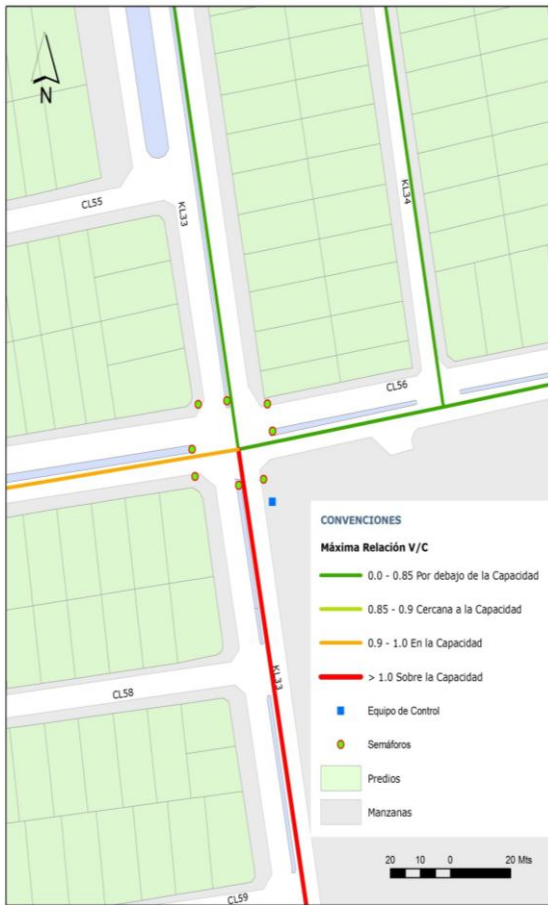
aislada, ya que no se requiere coordinación para progresión. Sí se cumple, se debe considerar si se presenta patrones conocidos, es decir, si a determinadas horas establecidas se sabe que el flujo vehicular es alto o bajo; esta condición generalmente se conoce en los principales corredores viales de una ciudad, por lo que casi siempre se selecciona en primera medida la estrategia de control de tiempos fijos. Si no, entonces se presenta otra condición, esta tiene que ver con el flujo que cruza el corredor principal; si este flujo es alto (saturado) se debe seleccionar un control fijo, si por el contrario se considera bajo, entonces una estrategia de control semiactuado es la recomendable.

Como ya se mencionó, el diagrama es una guía rápida de selección, sin embargo, el análisis detallado de una intersección puede complementar o cambiar totalmente la selección en base a la guía.

La utilización de la guía de Chang para la intersección de la carrera 33, arroja un control de tiempo fijo, como se encuentra actualmente la intersección; ya que la relación v/c es mayor a 0.4, figura 18; el tráfico pico es direccional generalmente en sentido norte-sur y viceversa, figura 20; y, presenta patrones conocidos, hay cuatro momentos pico en el día. No obstante, si se considera un parámetro adicional, prioridad al transporte público, figura 19; es necesario replantear dicha elección a un control totalmente actuado en el cual se detecte el paso de buses y se ajusten los tiempos del semáforo, para dar progresión a este flujo, corredor carrera 33.

Es claro que la decisión de un tipo de control involucra muchos más parámetros, y requiere una completa recolección de datos en campo que caractericen mejor la intersección; no obstante, es importante recordar lo complicado y costoso de esta toma de datos, por lo que generalmente se realiza una preselección en base a consideraciones cualitativas.

Figura 18. Relación Volumen-Capacidad Intersección K33 - C56



Fuente: Elaboración propia

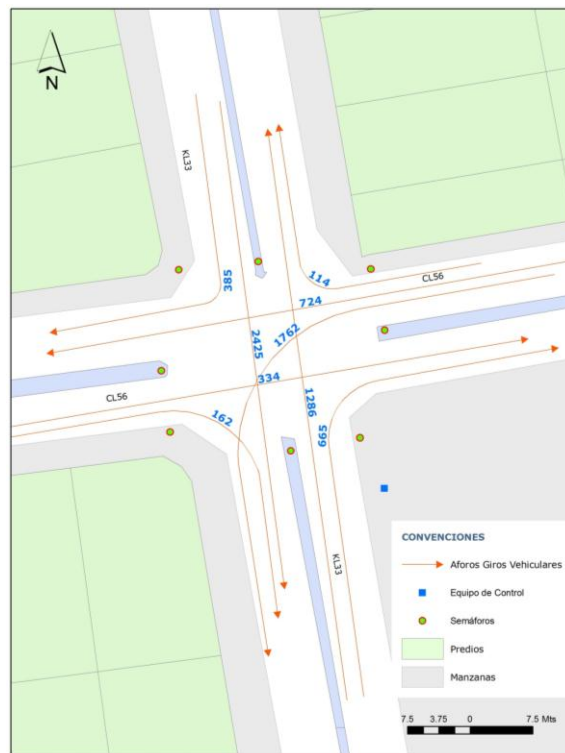
Figura 19. Cantidad Rutas de Buses Intersección K33 - C56



Fuente: Elaboración propia

Para evitar mencionar nuevamente el anterior proceso en cada intersección de análisis; en la Tabla 10 se presenta el listado de intersecciones analizadas y la estrategia de control seleccionada. Igualmente se presenta en la figura 21, el mapa de la Ciudad con la ubicación de todas las intersecciones semaforizadas y la estrategia de control utilizada.

Figura 20. Aforo Vehicular Intersección K33 - C56



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Listado de intersecciones semaforizadas y tipo de control

INTERSECCION				TIPO DE CONTROL
K- Carrera	C- Calle	DG - Diagonal	TV - Transversal	AV - Avenida
K15-C33		K25-C105		SEMIACTUADO
K15-C34		K27-C16		
K15-C36		K27-C17		
K15-C41		K27-C20		

INTERSECCION		TIPO DE CONTROL
K- Carrera	C- Calle	DG - Diagonal TV - Transversal AV - Avenida
K15-C42	K27-C21	
K19-AVQSeca	K33-C62	
K20-AVQSeca	K33-C63	
K21-C50	K9-C34	
K22-C105	K9-C36	
K22-C50	K9-C37	
K23-C105		
AVBucaros-C64	K22-C36	TIEMPO FIJO CON DETECTORES
AVValencia-C54	K22-C38	
AVValencia-C55	K22-C41	
K13-AVQSeca	K22-C45	
K15-C12	K23-C36	
K15-C15	K24-C36	
K15-C21	K25-C36	
K15-C22	K26A-AVValencia	
K15-C23	K27A-C45	
K15-C3	K27A-C48	
K15-C6	K27-C67	
K15-C9	K28-C34	
K16-C45	K28-C36	
K17-C35	K28-C45	
K17-C36	K28-C48	
K17-C37	K28-C56	
K17-C45	K29-C45	
K17-C52	K29-C48	
K17-C53	K30-C32	
K17-C61	K30-C33	
K17C-C55	K30-C34	
K17C-C56	K30-C67	
K17C-C61	K31-C52	
K18-AVQSeca	K32-C62	
K18-C20	K32-C63	
K18-C33	K33A-C32	
K18-C34	K35A-C48	
K18-C35	K35A-C51	
K18-C36	K35-C41	

INTERSECCION		TIPO DE CONTROL
K- Carrera	C- Calle	DG - Diagonal TV - Transversal AV - Avenida
K18-C37		K35-C42
K18-C45		K35-C45
K19-C15		K35-C52
K19-C19		K35-C52
K19-C33		K36-C34
K19-C34		K36-C41
K19-C35		K36-C42
K19-C36		K36-C45
K19-C37		K36-C48
K22-AVQSeca		K36-C51
K22-AVRosita		K36-C52
K22-C18		K38-C34
K22-C31		K5-C64
K22-C33		K8-C64
K22-C34		TVOriental-C93
K22-C35		TV Oriental-Santa Bárbara
AVValencia-C56		K23-AVRosita
DG15-AVRosita		K27-AVRosita
DG15-C55		K27-AVValencia
DG15-C56		K27-C14
K13-C36		K27-C32
K13-C37		K27-C33
K13-C45X		K27-C34
K14-C36		K27-C35
K14-C37		K27-C36
K15-C45		K27-C41
K15-DG14		K27-C45
K16-C105		K27-C48
K17-AVRosita		K27-C54
K17-C55		K27-C56
K17-C57		K30-AVQSeca
K18-AVRosita		K33A-AVQSeca
K21-AVQSeca		K33-AVQSeca
K21-AVRosita		K33-C32
K21-C31		K33-C34
K21-C33		K33-C36

TOTALMENTE ACTUADO O ADAPTATIVO

INTERSECCION				TIPO DE CONTROL	
K- Carrera	C- Calle	DG - Diagonal	TV - Transversal	AV - Avenida	
K21-C34		K33-C41			
K21-C35		K33-C42			
K21-C36		K33-C45			
K21-C37		K33-C48			
K21-C41		K33-C50			
K21-C45		K33-C52			
K21-C55		K33-C56			
K21-C56		K36-C56			
K22-C56		K9-C45			

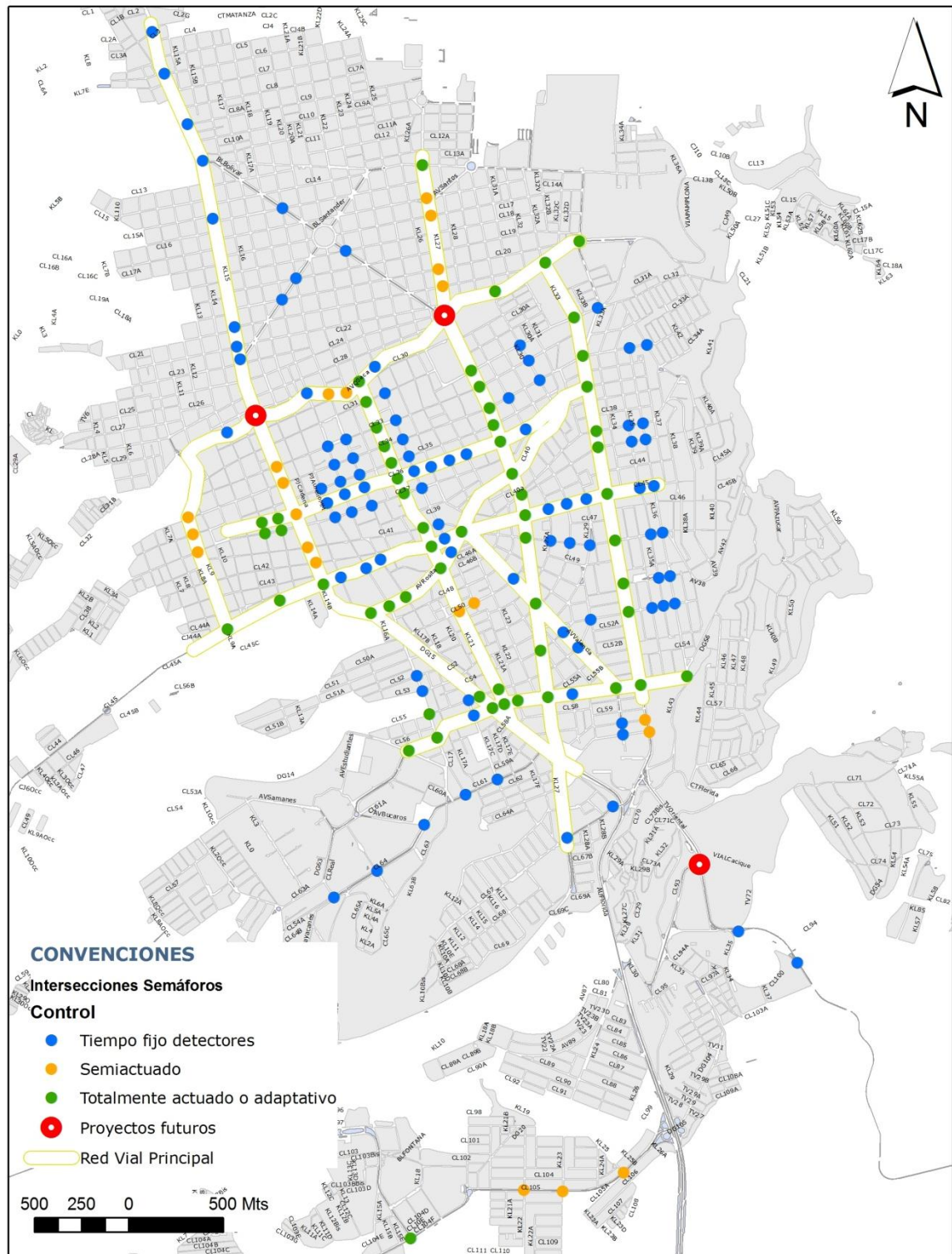
Fuente: Elaboración propia

En la figura 21 aparecen tres intersecciones diferentes, estas corresponden a sitios donde se tiene planeado realizar proyectos que no requieren semáforos, esto es, pasos a desnivel. Por lo tanto se excluyeron del análisis para asignar tipo de control semafórico.

Es importante resaltar tres corredores viales en el mapa, en los cuales la decisión del tipo de control a utilizar se basó en el tema de transporte público, Figura 22; es decir, deben tener prioridad en la asignación de los derechos de vía. En base a esta idea, se asignaron controles totalmente actuados o adaptativos; la principal característica de este tipo de control es la detección de todos los accesos a la intersección, Anexo A.

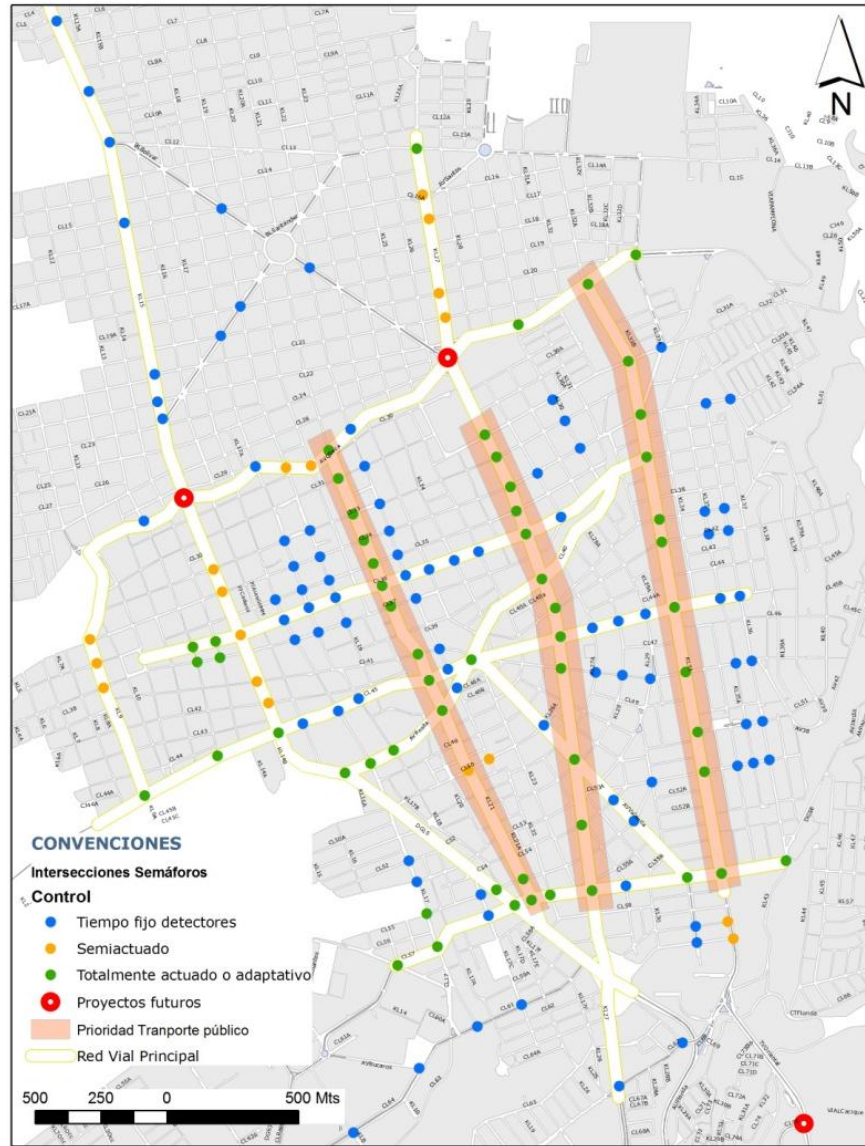
Los corredores viales corresponden a la Carrera 27, la Carrera 21 y la Carrera 33; en el primero, la presencia del sistema de transporte masivo, y, en los otros dos corredores, el transporte público de buses y colectivos; los tres en corredor vial mixto.

Figura 21. Intersecciones semaforizadas y tipo de control semaforico propuesto



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Corredores viales con prioridad al transporte público



Fuente: Elaboración propia

Un caso especial en la selección del tipo de control se presenta en el corredor vial de la Carrera 15 entre Quebrada Seca y Calle 45; el cual, es exclusivo para el sistema de transporte masivo; sin embargo, es atravesado por otros flujos a lo largo del corredor. Esta situación en la que los flujos vehiculares transversales son constantes, mientras que el longitudinal (Carrera 15) presenta bajas frecuencias de circulación, no puede ser regulada por un control de tiempos fijos. La solución

más beneficiosa es dar verde constante a los flujos transversales y cambiar a rojo cuando se detecte la presencia de un bus en la Carrera 15. Esta solución la ofrece el control semiactuado.

Figura 23. Ejemplo Control Semiactuado



Fuente: Elaboración propia

La mayoría de las intersecciones semaforizadas que no pertenecen a la red vial principal tienen asignada la estrategia de control de tiempo fijo con detectores, el cual, se diferencia del actual control de tiempo fijo, en el sentido de que la

detección del tráfico presente en la intersección, permite realizar la selección del plan de tiempos más acorde en ese momento para la intersección; de una lista de planes preestablecidos.

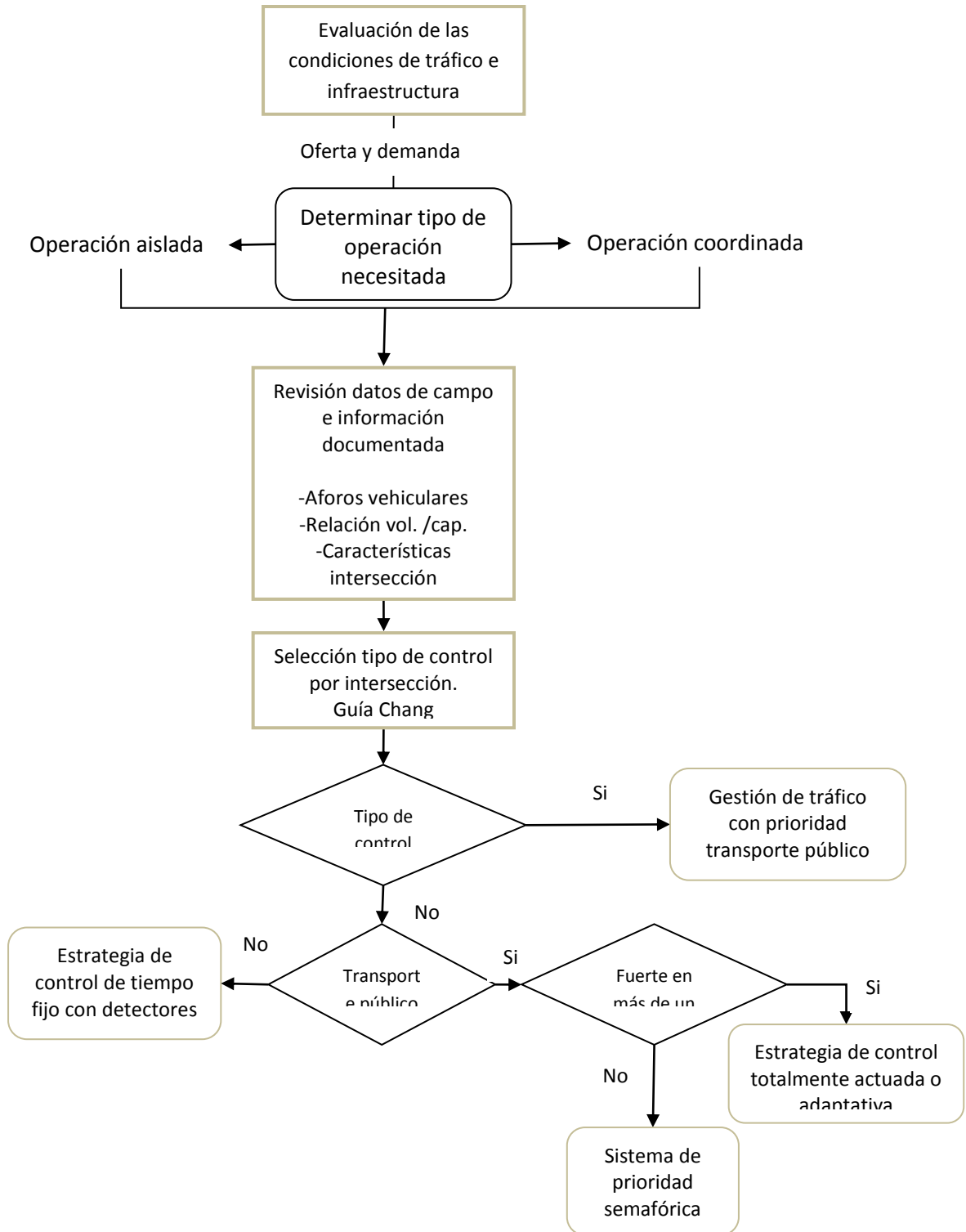
6.1 Metodología del proyecto

Con el interés recopilar el proceso de análisis del presente proyecto a través un esquema sencillo y fácilmente entendible; se elaboró un diagrama de flujo, el cual está estructurado en base a los conceptos y pautas seguidas en el proyecto. La elaboración de este diagrama está impulsada y justificada en la falta de una guía metodológica en la bibliografía consultada; para la selección de una estrategia de control en una red semafórica.

En la figura 24, se presenta el diagrama metodológico del presente proyecto el cual, presenta tres etapas principales: la primera, la evaluación de las condiciones de tráfico e infraestructura, es decir, un diagnóstico de la situación actual del escenario en consideración; una segunda etapa principal, es la revisión de la información con la que se cuenta, información ya sea numérica o cualitativa, esto con el fin de obtener fundamento en el cual basar la selección, que corresponde a la tercera etapa principal. En esta última etapa, se considera como referencia de selección la guía rápida que propone Chang; no obstante, la estrategia de control determinada con la guía de Chang, es evaluada posteriormente a través de un criterio muy importante en la movilidad urbana, es el caso del transporte público, el cual debe ser priorizado.

De acuerdo a lo anterior se presenta a continuación el diagrama metodológico:

Figura 24. Diagrama metodológico del proyecto



Fuente: Elaboración propia

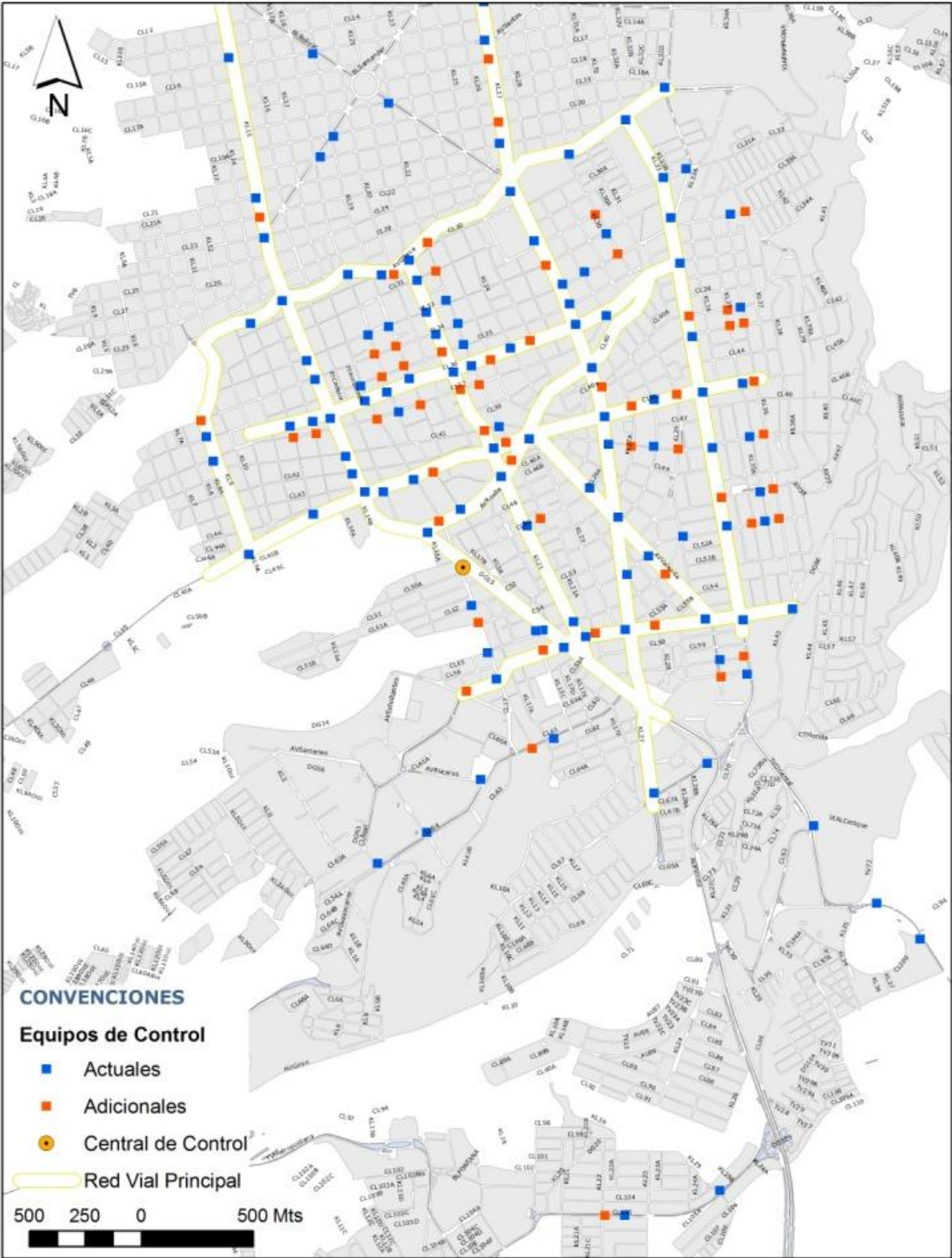
6.2 Diseño general red semafórica

Una vez definidas las estrategias de control en cada intersección semaforizada es necesario asignar los controladores a cada intersección. Para un sistema actuado como el que se pretende asignar a la Ciudad, es fundamental que se asigne un controlador a cada intersección coordinada; esto con el objetivo de poder asignar planes individuales de tráfico –pero teniendo en cuenta las otras intersecciones-, (página 45).

En base a lo anterior, se asignará un controlador (dispositivo de control) por intersección. En la Ciudad actualmente existen 117 equipos de control que regulan 172 intersecciones, por lo que será necesario ubicar 55 nuevos equipos de control para asegurar la independencia en la regulación; aunque realmente se necesitaran 52, debido a que tres intersecciones –los proyectos futuros- no requerirán esos equipos que tienen actualmente.

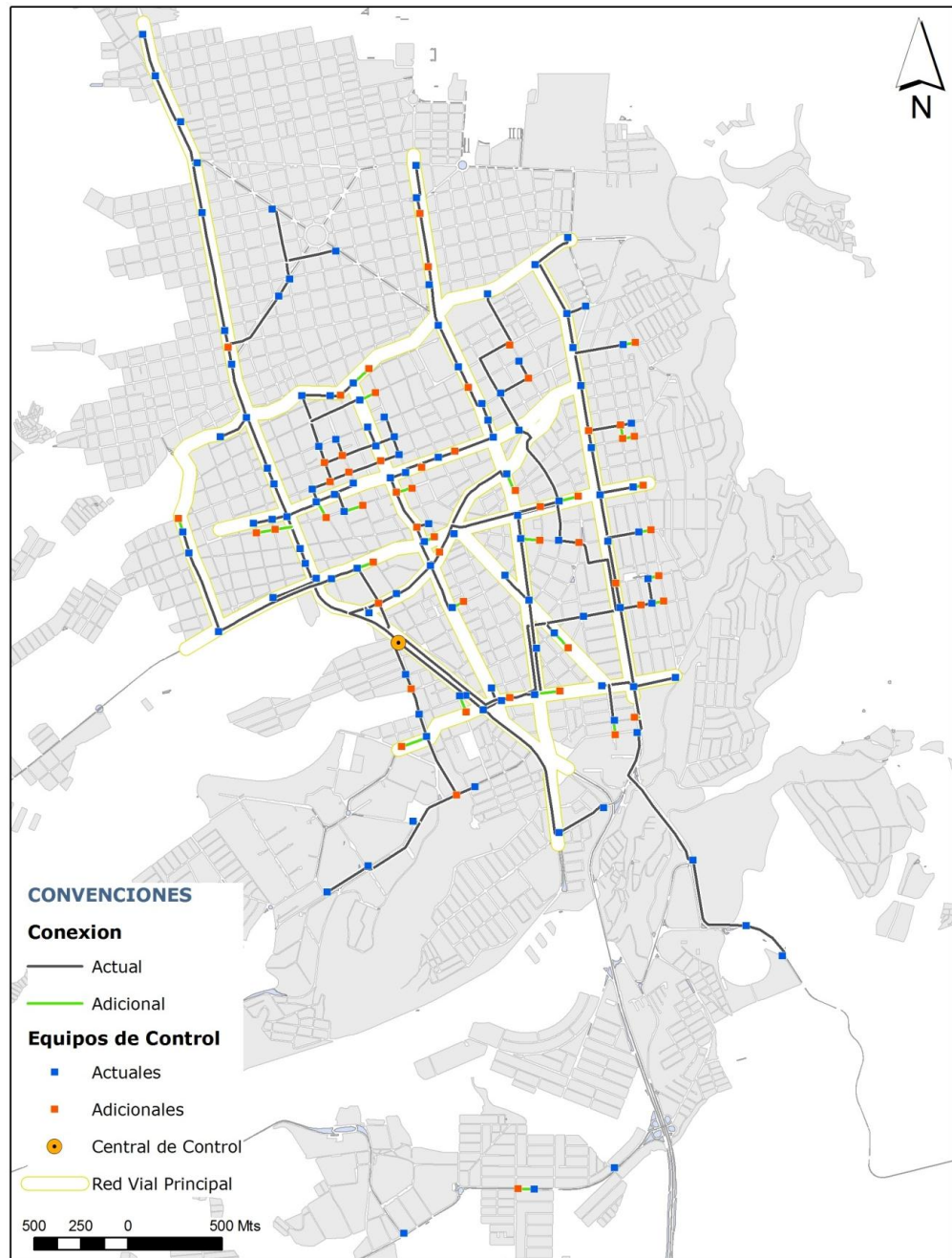
En la figura 25 se presentan ubicados los equipos de control que se encuentra actualmente y los que se requiere adicionar para la modernización. Igualmente, en la Figura 26, se representa la conexión que se tiene en el presente, junto con el complemento de conexión de los nuevos equipos de control.

Figura 25. Equipos de control, actuales y adicionales



Fuente: Elaboración propia

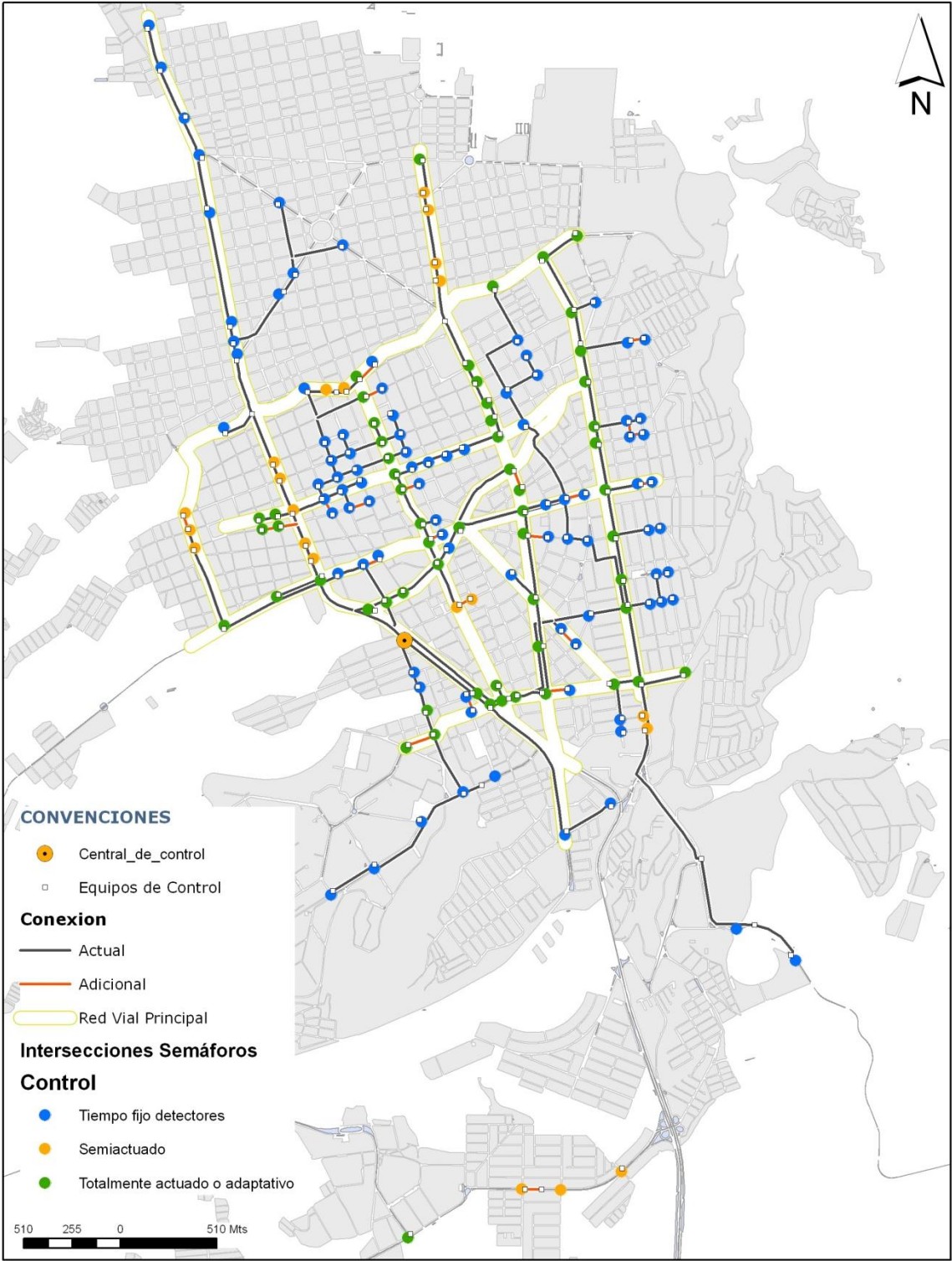
Figura 26. Red de conexión complementada



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se presenta en la Figura 27 la información consolidada y esquema final de la propuesta de diseño para la modernización de la red semafórica de la Ciudad.

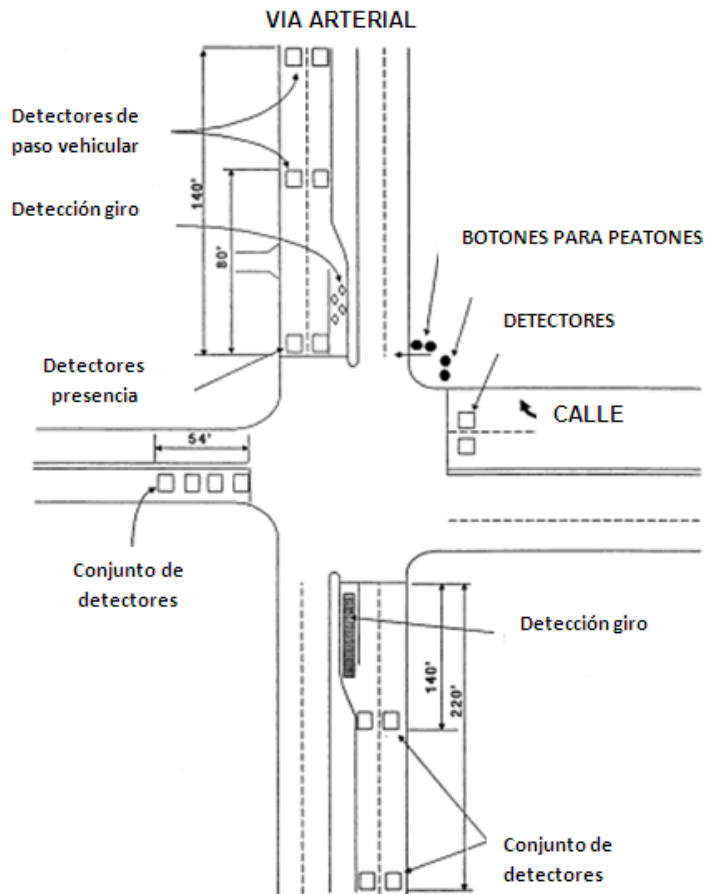
Figura 27. Esquema Red Semafórica Propuesta



Fuente: Elaboración propia

La Figura 28, presenta un esquema típico de la configuración en la intersección de los detectores vehiculares, para una estrategia de control totalmente actuada o adaptativa.

Figura 28. Configuración típica de detectores en una intersección



Fuente: Chang, Edmond, Guidelines for actuated controllers in coordinated systems

7 COSTOS Y CONSIDERACIONES DE TIEMPOS DE VIAJE DE USUARIOS

Las consideraciones presentadas para la elaboración de los costos de implementación, se basan en mayor medida en el proyecto presentado para la modernización de la red semafórica de la ciudad de Santiago de Cali; aunque el proyecto mencionado abarca la modificación de todo el sistema, desde cambio y adecuación de la señalización horizontal y vertical, hasta el mantenimiento de luminarias; solo se considerarán los valores correspondientes a equipos control, semáforos peatonales y actividades generales de instalación y obra civil. Igualmente, se utilizaron como referencia valores de otros proyectos presentados en la página www.contratos.gov.co

Para la elaboración del presupuesto se tuvieron asunciones y simplificaciones para corresponder con el diseño básico conceptual:

- Los controladores actuales sirven como complemento de la nueva configuración de la red semafórica. Igualmente la red de conexión (cableado y ducteria) puede ser utilizado.
- Los requerimientos (mantenimiento e instalación) del equipamiento actual de señalización y demarcación no son considerados.
- Los precios mencionados no corresponde a un proveedor determinado, aun cuando el protocolo del sistema actual de la ciudad sea cerrado.

En base a lo anteriormente mencionado, se presenta a continuación el presupuesto a grosso modo que representa la modernización del sistema de semaforización.

Tabla 11. Costos de implementación red semafórica

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
	I. SISTEMAS DE SEMAFORIZACIÓN				
1	Controladores 16 grupos vehiculares o peatonales con posibilidad de ampliación, reloj en tiempo real, 32 programas, automático semanal programable con días festivos, modo de operación coordinada con central de tráfico local con automático de semana, manual o con dependencia de tráfico, circuitos de supervisión de verdes conflictivos, rutina de seguridad por falla de lámparas rojas, activación errores de señales, capacidad para empleo de detectores de tráfico, cumple normas Colombianas, y recomendaciones de bajo voltaje, incluye módulo de conexión.	UN	52	21,675,500.00	\$ 1,127,126,000.00
2	Semáforos peatonales dinámicos de LED tipo S3 con unidad sonora para invidentes.	UN	26	1,126,155.00	\$ 29,280,030.00
3	Detectores de Lazos de Inducción de piso.	UN	172	1,689,230.00	\$ 290,547.560.00
4	Botones para demanda de peatones.	UN	26	1,243,750.00	\$ 32,337,500.00
	Subtotal equipos para semaforización				\$ 1,479,291,090.00
	II. OBRAS CIVILES				
5	Canalizaciones por vías asfaltada o en concreto incluyendo excavación, colocación de los	ML	1000	153,846.00	\$ 153,846,000.00

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
	detectores y repavimentación.				
6	Construcción caja de paso para el controlador de tráfico	UN	52	437,500.00	\$ 22,750,000.00
	Subtotal obras civiles				\$ 176,596,000.00
	Costos directos semaforización				\$ 1,618,724,030.00
	VALOR TOTAL SEMAFORIZACIÓN				\$ 1,655,887,090.00

Fuente: Elaboración propia en base a información página web
www.contratos.gov.co

➤ **Tiempos de viaje de usuarios**

El análisis presentado en esta etapa del proyecto, está fundamentado en la modelación de la red vial de Bucaramanga en el proyecto “Elaboración de los inventarios vial y parcial de tráfico” realizado por la UIS.

Tal proyecto consistió en estructurar la red de tránsito y transporte necesaria para realizar las modelaciones a nivel estratégico, de flujos de transporte privado y público del Área Metropolitana de Bucaramanga. La metodología está basada en la construcción de la red vial (transporte público y privado) y asignar información a cada tramo de esta. Seguido a este proceso de construcción de la red; el proyecto abordó las actividades de realizar encuestas origen-destino, con el fin de obtener indicadores de la tendencia de la movilidad en la Ciudad.

Finalmente, y luego de consolidar toda la información recopilada, se realizó el modelo de macro simulación del transporte público y privado, asignando flujos a la red.

Considerando esta macro simulación desarrollada, se pretende evaluar el diseño propuesto de modernización de la red semafórica de la Ciudad, y establecer los tiempos de viaje de los usuarios de la red actual y los de la red propuesta, en el día. Para realizar esto, se tuvieron en cuenta indicadores de los resultados de casos de estudio para diferentes sistemas de control implementados, Tabla 12.

De esta información se eligió como resultado más crítico para evaluar, un valor cercano al menor porcentaje de los indicadores de la tabla, en este caso 7%. Este porcentaje representa la mejora que un parámetro del modelo de macro simulación utilizado presentará; para esta situación se eligió la velocidad de viaje.

Tabla 12. Resultados representativos de evaluación de rendimiento

Control adaptativo	Ubicación	Resultados
OPAC	Virginia del Norte	Mejoramiento en 5-6% en paradas y demoras.
SCATS	Oakland, Michigan	Promedio de 7.8% en la reducción de demoras
	Newark, Delaware	Reducción en los tiempos de viaje mayor a 25%
SCOOT	Minneapolis, Minnesota	Reducción de demoras mayor a 19% en eventos especiales
	Toronto, Ontario	Disminución de 8% en tiempos de viaje y 17% en demoras
	Durban, Sudáfrica	Reducción de 7% en tiempos de viaje.

Fuente: FHWA, Traffic Control Systems Handbook

De acuerdo a este ajuste al modelo de macro simulación inicial de la red vial de Bucaramanga, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 13. Tiempos de viaje en la red actual y propuesta

Tiempo de viaje en la red [Horas]		
Actual	Propuesta	% de reducción
9978	8940	10.4%

Fuente: Elaboración propia

A pesar de que la reducción en hora es notable (1038 horas), es necesario cuantificar estos resultados en costos económicos. Para establecer es costo, se tiene según el **Estudio de preferencias declaradas para la reestructuración de rutas de transporte público del área metropolitana de Bucaramanga 2011**, realizado por la UIS; que el costo de viaje por minuto en la red, está valorado en \$69.59, lo cual a la hora representa 4175.4 \$/hora. Multiplicando esta cifra por la diferencia entre tiempos de viaje actual y propuesto, se tiene un ahorro de 4'334.065 \$/hora-día. Y considerando las cuatro horas pico que se presentan en la Ciudad, se estaría hablando de una reducción en los costos de viaje por valor de 13'002.196 \$/día.

Ahora, si se considera esta condición en cerca de 300 días en el año, se logra alcanzar la cifra de **3.900'658.680 \$/año**. Sin duda alguna la implementación del sistema de modernización estaría justificada

8 CONCLUSIONES

- Por motivo de la falta de una metodología definida para la selección de un tipo de control en la bibliografía consultada; y complementando con ideas presentadas en el proyecto, se elaboró un diagrama sencillo de análisis para determinar la estrategia más apropiada de control en una intersección.
- Se elaboraron mapas en los cuales se encuentra especializada la información obtenida de tránsito, como la ubicación de los equipos de control y la red de conexión entre ellos. Información que la entidad no posee especializada en ningún medio digital.
- La elaboración del tutorial se justificó debido a que no se encuentra en la bibliografía nacional publicaciones enfocadas en el control semafórico de tráfico que sirva al mismo tiempo como herramienta básica de aprendizaje en el tema.
- El desconocimiento y falta de implementación de las tecnologías más actuales de gestión del tráfico, son debidos a varios aspectos: costo económico de adquisición, instalación, capacitación de personal, instalación y mantenimiento; pero sobretodo, en la complejidad de la dinámica del tráfico y la dificultad de modelarlos y evaluarlos en dichos sistemas modernos, es por tales motivos que la implementación de sistemas convencionales son los más comunes.
- Los problemas de congestión y movilidad en las ciudades no son eliminados con la implementación de semáforos; sobre todo, considerando que el objetivo principal de estos, es brindar seguridad al conductor y a los peatones; y que dichos problemas se deben a un sinnúmero de factores que van desde la infraestructura urbana hasta la cultura ciudadana. No obstante, estos dispositivos de control representan los mecanismos más idóneos para realizar las funciones de regulación y control, siempre y cuando se efectúe una buena gestión de ellos por parte de personal calificado.

- Las desventajas que presentan los sistemas de control actuado, están representados básicamente en temas económicos de instalación, mantenimiento y operación; sin embargo, los beneficios que la implementación de estos sistemas abarca, corresponde a: disminución en el consumo de combustible, reducción en las emisiones vehiculares y reducción en los costos a los usuarios de las vías (tiempos de viaje, paradas, accidentes, etc.).
- Los avances de la tecnología actualmente permiten gestionar aspectos del transporte de manera más eficiente y real, a tal punto que es posible establecer el impacto que causan estos sobre diferentes escenarios (social, ambiental y económico); es entorno a esos avances que se deben enfocar las estrategias y proyectos que se realicen a corto y largo plazo para de esta manera obtener resultados que perduren en el tiempo y no generen costes de toda índole a la ciudadanía.
- La implementación de tecnologías actuales para el control y regulación del tráfico y el sistema de transporte público requiere de grandes costos económicos, referidos a equipos, mantenimiento, y manejo operacional. Sin embargo, es importante considerar los estudios e investigaciones en torno a los costos que genera la congestión, no solo a nivel económico sino además a nivel social, cultural y sobre todo medioambiental; y de esta manera establecer la justificación de dichos costos de implementación.
- La dificultad para desarrollar proyectos de investigación en torno al tema de control semafórico, se debe principalmente a la escasa información disponible para tales estudios; esto debido a varios factores, entre ellos, los detectados en este proyecto, como son: la mayor parte de información que se recoge en campo ha sido realizada por entidades privadas, lo cual imposibilita su acceso; y la información que posee la dirección de tránsito no es fácilmente asequible, a pesar de ser una entidad pública.
- La implementación de sistemas con protocolos cerrados limita las alternativas de solución a los problemas de congestión en la Ciudad, ya

que, estos sistemas no permiten la interoperabilidad entre los servicios que ofrecen los distintos proveedores.

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la creación de frentes de trabajo comunes entre las diferentes instituciones que tienen que ver con el tema de transporte y sistema de semaforización de la Ciudad, tales como: La Dirección de Transito de Bucaramanga y el Área Metropolitana, el Fondo de Prevención Vial, las empresas de transporte público, entre otros; para de esta manera crear estrategias en el mismo sentido que permitan avanzar en el tema de la gestión del tráfico y del espacio público.
- Gestionar el desarrollo de una herramienta SIG, en la cual se pueda consolidar toda la información referente a la regulación y control semafórico de la Ciudad, debido a que actualmente toda esta información de mapas de ubicación de intersecciones, rutas de las redes de conexión, planes semafóricos, etc.; se encuentran en papel y en el conocimiento de los técnicos encargados.
- Impulsar el desarrollo de los temas de transporte y la gestión del tráfico, en todos los aspectos, económica, social y operacionalmente; en la Universidad para de esta manera generar más proyectos de investigación que ofrezcan diversas alternativas de solución, con la visión de que sean los Ingenieros Civiles de la UIS los que estén encargados de la gestión del transporte en la Ciudad.
- Se recomienda la utilización de sistemas con protocolos abiertos para el proceso de modernización de la red semafórica de la Ciudad, ya que el sistema actualmente establecido solo permite tecnología Siemens, lo cual limita la elección de varios sistemas y proveedores, y, elimina la interoperabilidad de estrategias diversas.

10 INVESTIGACIONES FUTURAS

Considerando el aspecto conceptual del presente proyecto, el cual contó con la información necesaria y suficiente para abordar el tema objetivo; se dejan cimentadas las bases para la posterior evaluación de las estrategias de modernización planteadas desde un enfoque operacional que además de los modelos de macro simulación utilizados, contemple el uso de modelos de micro simulación, con el fin de incluir nuevas variables a la metodología propuesta.

BIBLIOGRAFIA

La imagen correspondiente a la portada del tutorial fue tomada de internet.

An overview of transit signal priority. Advanced Traffic Management Systems Committee and Advanced Public Transportation Systems Committee of the Intelligent Transportation Society of America. Washington, D.C.: 2002

ANGUS P. Davol. Modeling of Traffic Signal Control and Transit Signal Priority Strategies in a Microscopic Simulation Laboratory, 1997

BONETTI Jr., Wagner. Utilização de semáforos atuados pelo tráfico, 2001

BOTERO GARCIA, Tomás, Revisión y rediseño de la planeación semafórica de las intersecciones viales de la ciudad de Manizales, a partir de información básica existente, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2008

CAÑELLES, David Sanz, Análisis Operativo y Medioambiental de los Sistemas de Prioridad Semafórica, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009

CED. Sistema integrado de Transporte: una alternativa para la movilidad en Bogotá, 2007

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Tendencias y políticas referente a los sistemas de transporte de las ciudades de América Latina, y las implicancias para su sostenibilidad, 2001

C. Nwagboso, P. Georgakis*, D. Dyke. Time compression design with decision support for intelligent transport systems deployment, 2004

DENATRAN, Manual de Semáforos, Brasil 1984

Diagnóstico del Plan Maestro de Movilidad Urbana para el Municipio de Bucaramanga, 2010

FHWA (Federal Highway Administration), Manual on Uniform Traffic Control Devices, 2003

FHWA (Federal Highway Administration), *Traffic Control Systems Handbook*, 2005

FHWA (Federal Highway Administration), *Traffic Detector Handbook, Third Edition V.1*, 2006

FHWA (Federal Highway Administration), *Traffic Signal Operations Handbook*, 2009

GARCÍA FERNÁNDEZ, Luis Amable, Diseño e Implementación de una Arquitectura Multiagente para la Ayuda a la Toma de Decisiones en un Sistema de Control de Tráfico Urbano, 2000

ITS AMERICA, Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook, 2005

KULMALA, Risto. Ex-ante assessment of the safety effects of intelligent transport systems, 2010

Ministerio de Transporte, Manual de Señalización. Dispositivos para la regulación de tránsito en Calles, Carreteras y Ciclo rutas de Colombia, 2004

PAVEZ, Claudio, Estimación de costos operacionales producto de eventos de falla en una red de semáforos: Aplicación caso la Serena y Coquimbo, 2007

PING CHANG, Edmond Chin, Guidelines for Actuated Controllers in Coordinated Systems, 1996

POZUETA, Julio. Movilidad y planeamiento sostenible: Hacia una consideración inteligente del transporte y la movilidad en el planeamiento y en el diseño urbano, 2000

SALCEDO V., Juoy, Sistema de monitoreo de tráfico y control de intersecciones para el laboratorio de ingeniería de transportación, Universidad de Puerto Rico, 2009

SEDESOL (Secretaria de Desarrollo Social), Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas

SEGUI PONS, J.M. Los Sistemas Inteligentes de Transporte. Efectos territoriales a partir del estudio de casos. III Congreso Nacional sobre Sistemas Inteligentes de Transporte. Seguridad, Información y Tecnología. Palma: Asociación Española de la Carretera, 2002, p.185-186

TAYLOR, M.A.P. New Technologies in Transport *A draft discussion paper for the National Committee on Transport* (NCTR) of IEAust [En línea]. Transport Systems Centre. University of South Australia, 2003

THOMSON, I., y Bull, A. La congestión del tránsito urbano: Causas y consecuencias económicas y sociales, 2002

TIAN, Zhili, Capacity Analysis of Traffic-Actuated Intersections, MIT, 2002

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Highway Capacity Manual (HCM), 2000

U.S. Department of Transportation, Intelligent Transportation Systems Benefits, Costs, Deployment, and Lessons Learned, 2008

W. Wen. *A dynamic and automatic traffic light control expert system for solving the road congestion problem*, 2008

XIE, Yuanchang, Development and evaluation of an arterial adaptive traffic signal control system using reinforcement learning, 2007

YUU, Ilsoo, *Stochastic Optimization Method for Coordinated Actuated Signal Systems*, 2005.

ANEXOS

ANEXO A: TUTORIAL DE CONTROL SEMAFORICO

TUTORIAL

CONTROL SEMAFÓRICO DE TRÁFICO



Universidad
Industrial de
Santander



TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	7
2	CONCEPTOS BÁSICOS.....	10
3	CONTROL DE TRÁFICO	15
3.1	Señalización vial.....	15
3.2	Semáforos.....	17
3.2.1	Elementos que componen el semáforo	18
3.2.2	Ventajas y desventajas de los semáforos	20
3.2.3	Significado de las indicaciones del semáforo	21
3.2.4	Tipos de semáforos.....	22
4	CONTROL SEMAFÓRICO DE TRÁFICO	25
4.1	Orden de implementación de controles semaforicos.....	27
4.2	Regulación semaforica.....	28
4.3	Sistema operacional de los semáforos.....	31
4.3.1	Semáforo aislado	31
4.3.2	Semáforos coordinados.....	31
4.4	Sistemas de control de tráfico	33
4.4.1	Sistema de control pre-sincronizado o de tiempo fijo	34
4.4.2	Sistema de control actuado	35
4.5	Escenarios de control.....	40
4.5.1	Intersección aislada.....	40
4.5.2	Coordinación arterial	41
4.5.3	Control en red.....	42

4.6	Detectores para el control de tráfico.....	44
4.6.1	Detectores vehiculares.....	45
4.6.2	Detectores de peatones	49
4.6.3	Detectores para vehículos de emergencia	49
5	SISTEMAS DE PRIORIDAD SEMAFORICA.....	52
5.1	Sistemas Pasivos de Prioridad Semafórica.....	53
5.2	Sistemas activos de prioridad semafórica	54
5.2.1	Extensión de verde (<i>green extension</i>):.....	54
5.2.2	Truncado de rojo (<i>early green</i>):.....	55
5.2.3	Fase actuada (<i>extra stage</i>):.....	56
5.3	Sistemas en tiempo real	56
5.4	Beneficios y costos.....	57
5.5	Parámetros considerados en la implementación de sistemas de priorización de tráfico.	59
5.5.1	Interacción entre agencias del transporte público y particular.....	60

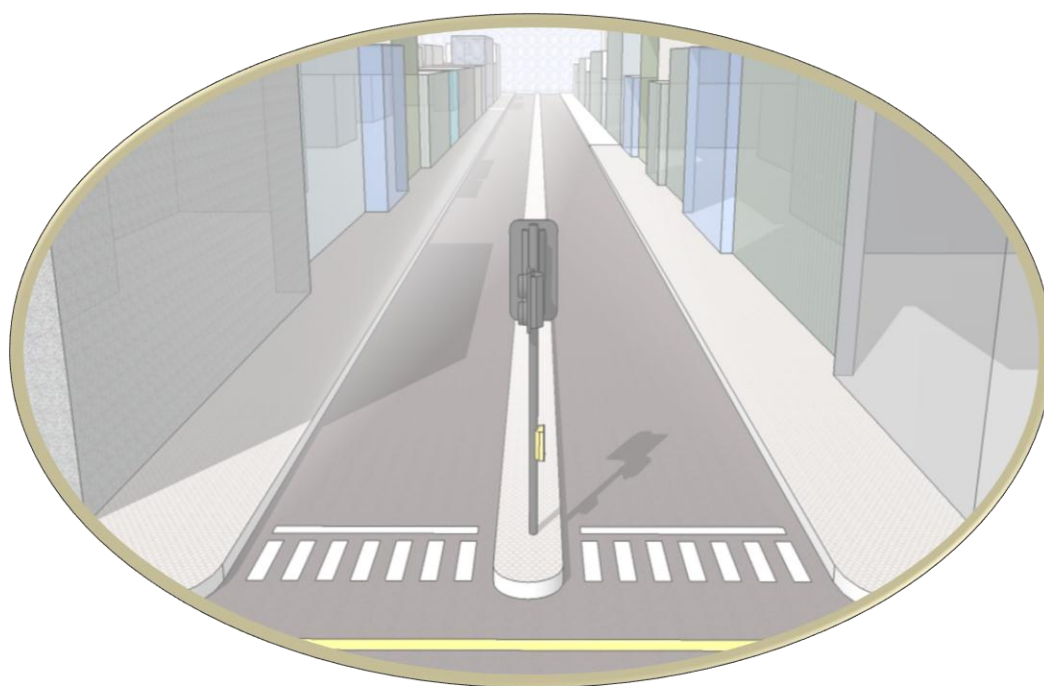
LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Semáforos montados en postes o en ménsula corta.	19
Figura 2.	Semáforos montados en ménsula larga, sujeta a poste lateral.....	19
Figura 3.	Semáforo montado, suspendido por cable.....	20
Figura 4.	Tipos de intersección.	29
Figura 5.	Intersección tipo T	30
Figura 6.	Diagrama de fases	30
Figura 7.	Ejemplo de intersección aislada y coordinada con control local y central respectivamente.....	32
Figura 8.	Esquema representativo de la fase actuada.	36
Figura 9.	Flujo progresivo sobre coordinación de semáforos	41
Figura 10.	Esquema de actuación de extensión del verde	55
Figura 11.	Esquema de actuación truncado de rojo	55
Figura 12.	Esquema de actuación de fase actuada	56
Figura 13.	Esquema básico de Sistema de Priorización	58
Figura 14.	Experiencias internacionales con la implantación de sistemas de prioridad semafórica	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Tipos de semáforos.....	22
Tabla 2.	Volumen mínimo de vehículos	25
Tabla 3.	Interrupción del tránsito continuo	26
Tabla 4.	Criterios para una instalación de semáforos para peatones	26
Tabla 5.	Lógicas de control	43
Tabla 6.	Ventajas y desventajas de los Sistemas de Control de Tráfico.....	44

Capítulo 1



Introducción

1 INTRODUCCIÓN

La elaboración de este tutorial tiene como finalidad difundir y dar a conocer los conceptos básicos en el tema de control semafórico y las estrategias que en este tema se están implementando. Esto con el objetivo de interesar e incentivar a estudiantes e investigadores a adelantar estudios al respecto, así como, presentar estos temas para el conocimiento general.

El tutorial ha sido dividido en cinco capítulos, organizados de tal manera que se realice un entendimiento progresivo del tema general. Para ello, se presenta en el segundo capítulo los conceptos básicos, los cuales serán utilizados en los demás capítulos, para la comprensión de los temas.

El capítulo tercero tiene como idea principal el control de tráfico, en donde se hace una breve mención acerca de los elementos utilizados en la señalización vial (marcas, signos y señales) que aportan a la buena circulación del tráfico, en la medida en que ayudan a prevenir, guiar e informar a conductores y peatones acerca de cierta situación de peligro. De igual forma se presenta una breve reseña histórica de los semáforos, sus funciones, los tipos de semáforos y otras ideas que permiten entender mejor su importancia en la movilidad.

Con base al tema de semáforos, en el cuarto capítulo se presenta lo correspondiente al control semafórico de tráfico. En esta parte, el objetivo es dar a conocer los parámetros mínimos necesarios para la implementación de control semafórico tanto para vehículos como para peatones. Este capítulo es de gran importancia ya que en él se incluye lo correspondiente a regulación semafórica, tema principal de tutorial; en este capítulo se presenta las diferentes maneras de controlar una intersección semaforizada, sus características de funcionamiento, y que beneficios y desventajas presenta cada uno en comparación con los otros. Ya al final del capítulo, a manera de información básica, se describen las

herramientas que utilizan ciertos tipos de controladores de tráfico para su óptimo desempeño.

Finalmente, el quinto capítulo presenta un tema de gran importancia para la movilidad en los centros urbanos, y que debe ser considerado simultáneamente con el control semafórico; es el caso de la prioridad semafórica, tema que se fundamenta en la importancia del transporte público y en la necesidad de que este tenga prioridad frente a otros medios de transporte.

El tutorial no pretende ser una guía normativa, ni un compendio de complejas formulas; la idea es presentar los conceptos básicos, para la introducción en el amplio campo que corresponde al control de tráfico, el cual abarca un sinnúmero de temas, todos sumamente importantes, y que precisan de amplios estudios para su comprensión.

Capítulo 2



Conceptos Básicos

2 CONCEPTOS BÁSICOS

Para un adecuado entendimiento de los temas abordados en el tutorial, es necesaria una descripción de los conceptos que definen cada variable pertinente a cada tema. En este capítulo son descritas y definidas las variables básicas y particulares para el estudio de cada caso, en la forma que sigue:

Acceso: Conjunto de carriles que acomodan todos los movimientos de vueltas izquierdas, de frente, y derechas que llegan a una intersección, desde una dirección dada.

Calle o carrera: Vía urbana de tránsito público, que incluye toda la zona comprendida entre los linderos frontales de las propiedades.

Calzada: Zona de la vía destinada a la circulación de los vehículos.

Capacidad: Es el máximo número de vehículos que puede circular en un punto dado durante un periodo específico de tiempo, bajo condiciones prevalecientes de la carretera y el tránsito. Usualmente expresado en vehículos por hora, pasajeros por hora o personas por hora.

Carretera: Vía diseñada para el tránsito de vehículos terrestres automotores.

Carril: Parte de la calzada que puede acomodar una sola fila de vehículos de cuatro o más ruedas.

Ciclo: es el tiempo necesario para que se dé una sucesión completa de indicaciones en los semáforos que se encuentran conectados a un mismo regulador. El ciclo es, por tanto, el tiempo total de verde más ámbar más rojo, que es común para los semáforos de una intersección.

Control de tiempo fijo: Control en el cual la longitud de ciclo, plan de fase, y tiempo de fase se repiten continuamente

Control semiactuado: Control en el cual algunos accesos (típicamente vías secundarias) tiene detectores, y algunos no (vías principales).

Control totalmente actuado: Control en el cual los detectores de vehículos en cada acceso a la intersección controlan la ocurrencia y longitud de cada fase.

Coordinación ente señales: Permite controlar los comienzos y duraciones de los periodos de luz verde de los semáforos pertenecientes a intersecciones adyacentes con el propósito de que, en la medida de lo posible, se produzca el mínimo número posible de interrupciones del flujo de tráfico a lo largo de una ruta o en determinadas zonas urbanas.

Densidad de tránsito: Número de vehículos que ocupan una unidad de longitud de carretera en un instante dado. Por lo general se expresa en vehículos/kilometro.

Desfase: Diferencia en segundos entre el inicio de verde en dos intersecciones semaforizadas adyacentes.

Despeje: Tiempo necesario para que aquellos vehículos que hayan accedido a la intersección durante el tiempo de verde, salgan de esa zona y la dejen libre para la canalización de los movimientos siguientes. De esta manera, el despeje corresponde con los instantes en los que todos los semáforos de la intersección se encuentran en rojo.

Embotellamiento: Se refiere tanto urbana como inter-urbanamente, a la condición de un flujo vehicular que se ve saturado debido a una sobredemanda de las arterias viales, produciendo incrementos en los tiempos de viaje. Este fenómeno se produce comúnmente en las llamadas hora punta (horas pico), y resultan frustrantes para los automovilistas, ya que ven en estas pérdidas de tiempo.

Fase: Cada una de las combinaciones de indicaciones que permiten uno o varios movimientos simultáneamente a través de la intersección, es decir, es el tiempo donde no se produce ningún cambio de color en los semáforos que hay en una intersección.

Hora punta (hora pico): Se refiere a las distintas horas en las que regularmente se produce mayor flujo vehicular y se presentan congestiones.

Intersección: Espacio en el cual convergen dos a más vías con movimientos de vehículos diferentes.

Intersección semaforizada: Intersección regulada permanentemente mediante sistemas de señales de semáforo que establecen las prioridades de paso por esta.

Intervalo: Cualquiera de las distintas divisiones de un ciclo durante el cual las indicaciones de semáforo no cambian.

Línea de detención (línea de parada): Marca de tránsito ante la cual deben detenerse los vehículos por indicación de una autoridad competente o de una señal de tránsito.

Marca de tránsito: Elemento señalizador colocado o pintado sobre el pavimento o en elementos adyacentes al mismo, consiste en líneas, dibujos, colores, palabras o símbolos.

Nivel de servicio: Medida de calidad que describe las condiciones operacionales dentro de un flujo de tráfico, por lo general en términos de medidas de servicios tales como la velocidad y tiempo de viaje, la libertad de maniobra, las interrupciones de tráfico, la comodidad y conveniencia.

Ola verde: Encendido paulatino de verde para que a lo largo del corredor, el flujo se presente ininterrumpido.

Paso para peatones: Zona transversal al eje de un camino destinada al cruce de peatones mediante regulación de la prioridad de paso.

Plan de señales: Combinación de movimientos de tráfico recibiendo el derecho de vía simultáneamente durante uno o más intervalos.

Reparto de ciclo: Distribución del ciclo entre los distintos ramales que confluyen en la intersección. De otra manera, es la duración o el porcentaje de cada una de las fases que componen el ciclo de una intersección.

Semáforo: Dispositivo de control de tráfico, que a través de indicaciones luminosas transmitidas para conductores y peatones, alterna o directa al derecho de paso de vehículos y/o peatones en intersecciones de dos o más vías.

Sincronización: Repetición exacta en el tiempo de las indicaciones del semáforo durante su periodo de funcionamiento.

Sistema: Combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.

Tiempo de ámbar: Tiempo que se le confiere en una intersección para el cambio de verde a rojo, que se encuentra fijado con una duración entre los 3 y 4 segundos.

Tiempo de reacción: Tiempo que transcurre desde que el semáforo se pone en verde hasta que los vehículos arrancan. En general, se considera este tiempo entre 2 y 3 segundos, aunque se disminuye si se instalan repetidores a la altura de los ojos del conductor.

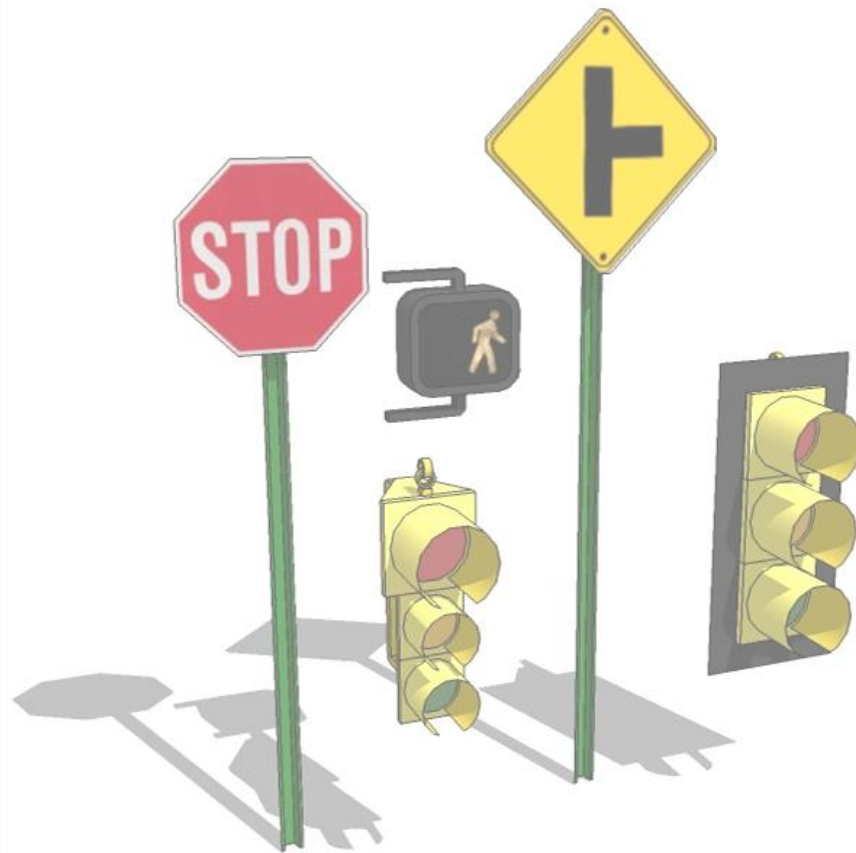
Tiempos muertos: Los tiempos muertos son los relacionados con el Despeje. Son los segundos en los que se proporciona una fase donde todos los semáforos están en rojo y dan el tiempo necesario para que los vehículos se despejen de la intersección antes de iniciar el verde de la fase posterior.

Tránsito (Tráfico): Acción de desplazarse de personas, vehículos y animales por vías públicas.

Volumen peatonal: Número de peatones circundante por un punto o sección transversal de un andén o corredor peatonal durante un periodo de tiempo determinado.

Volumen vehicular: Número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados de un carril o calzada durante un periodo determinado.

Capítulo 3



Control de Tráfico

3 CONTROL DE TRÁFICO

Dentro de las técnicas de control de tráfico en una red vial, existen métodos formales e informales que permiten maximizar los resultados esperados. Los métodos formales son las señales, demarcaciones en el pavimento y los semáforos. Los métodos informales se encuentran basados en la influencia de la geometría de la vía, experiencias personales, otros vehículos y conocimientos previos. El método más importante es el formal, ya que este es la última alternativa cuando el conductor no tiene acceso a fuentes de información informal.⁷ Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones (prevenciones) que deben tener en cuenta, las limitaciones (restricciones) que gobiernan el tramo en circulación y las informaciones (guías) estrictamente necesarias, dadas las condiciones específicas de la vía.

En el presente capítulo, se expondrán los diferentes elementos para el control del tráfico, su funcionalidad y de qué manera estos mecanismos de control influyen sobre los usuarios de las vías.

3.1 Señalización vial

Una de las soluciones para mitigar los impactos de la congestión es realizar una adecuada regulación del tránsito. Se puede hacer mediante las señales de tránsito que son una valiosa herramienta para mejorar la seguridad y eficiencia del tránsito vehicular y peatonal presente en un corredor vial, ya que permite hacer control sobre ciertos tipos de accidentes.

La señalización surge por la necesidad de mantener informado al conductor del vehículo y peatones acerca de las características de la vía por la que circula y del entorno por el que este discurre. Así la señalización sirve para advertir de la existencia de peligros, informar sobre ciertas normas viales en un tramo y orientar

⁷ SEDESOL, Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito, Tomo XII, 2001.

al usuario: la ubicación donde se encuentra, hacia dónde va y qué rumbo tomar para cambiar de destino.

Estas señales de tránsito se colocan a lo largo, al lado o por encima de una carrera, camino o ruta. Según el Manual de Señalización Vial del Ministerio de Transporte de Colombia de 2004, las herramientas para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas son (i) señalización horizontal o marcas viales, (ii) señalización vertical o señales de tráfico y (iii) señalización electrónica.

La señalización horizontal corresponde a la aplicación de marcas viales, conformadas por líneas, flechas, símbolos y letras que se pintan sobre el pavimento, bordillos o sardineles y estructuras de las vías de circulación o adyacentes a ellas, así como los objetos que se colocan sobre la superficie de rodadura, con el fin de regular, canalizar el tránsito o indicar la presencia de obstáculos.

La señalización vertical se basa en la implementación de placas fijadas en postes o estructuras sobre la vía o adyacentes a ella y de acuerdo con la función que cumplen las señales verticales se clasifican en: señales preventivas que son las que advierten a los usuarios la existencia de un peligro en la vía y tienen forma de rombo, símbolo negro y fondo amarillo; las señales reglamentarias que son las que indican a los usuarios las limitaciones, prohibiciones o restricciones en las vías y su forma es circular, símbolo negro, fondo blanco y borde rojo; y las señales informativas que identifican las vías y guían al usuario, proporcionándole ciertos datos que pueden necesitar y estas tienen forma rectangular, fondo azul y marco blanco. Y por último, la señalización electrónica que corresponde a los semáforos.

3.2 Semáforos

El semáforo es un dispositivo de señalización esencial para el control y seguridad vehicular y peatonal en las intersecciones, al asignar el derecho de paso en diferentes direcciones. Este da las indicaciones a los conductores y peatones de cuándo parar y cuándo seguir, de acuerdo a las indicaciones de luces de color rojo, amarillo y verde, operadas por una unidad electrónica de control.

Al primer artefacto que se le llamó semáforo fue a una torre destinada a transmitir señales a distancia, especialmente desde la costa a los barcos. El primer semáforo para controlar una red vial fue instalado en *Parliament Square*, Londres, en 1668, el cual uno de sus componentes para el funcionamiento era el gas; se utilizaba en la noche con luz roja y verde y era útil para vehículos de tracción animal. Los primeros semáforos eléctricos en América fueron instalados en Cleveland, Ohio, el 5 de Agosto de 1914. En 1917, William P. Eno, que fue una de las personalidades que más contribuyó al desarrollo de la Ingeniería de Tráfico, él instaló un semáforo en Detroit, con luz roja, ámbar y verde, al que denominó “torre de tráfico”. Los primeros semáforos actuados por el tráfico fueron implementados en Gran Bretaña en 1932, en una intersección de las rutas Gracechurch y Cornhill, en Londres. El primer semáforo exclusivo para peatones fue desarrollado por el Ing. Henry Barnes en una ciudad de New York en 1960, en una región de Manhattan por causa de grandes flujos de peatones⁸.

Los semáforos a diferencia de las señales de tránsito tienen la función de controlar el tráfico en una intersección, y además, es un artefacto electrónico el cual funciona como un sistema. Los semáforos precisan mayor control y mantenimiento a diferencia de las señales de tránsito, por lo cual, requieren de varios equipos electrónicos y personal para su funcionamiento.

⁸ APARECIDA, Isabela; Investigações no campo da programação semafórica, 2010

3.2.1 Elementos que componen el semáforo

Al semáforo lo compone una serie de elementos físicos y funcionales, tales como: cabeza, cara, lentes, visera, soportes y placa de contraste. La cabeza es la parte visible del semáforo que tiene un número determinado de luces orientadas en diferentes direcciones. Se llama cara del semáforo a las luces que están orientadas en la misma dirección. En cada cara del semáforo, existen dos o tres unidades ópticas, conformadas por una bombilla, un reflector cóncavo para concentrar el haz luminoso en una dirección. La visera se coloca encima o alrededor de cada una de las unidades ópticas, esta evita que a determinadas horas del día, los rayos del sol lleguen sobre ellas y den la impresión a los conductores y a los peatones que están iluminadas, y pueden impedir que la luz pueda ser vista desde otros lugares.

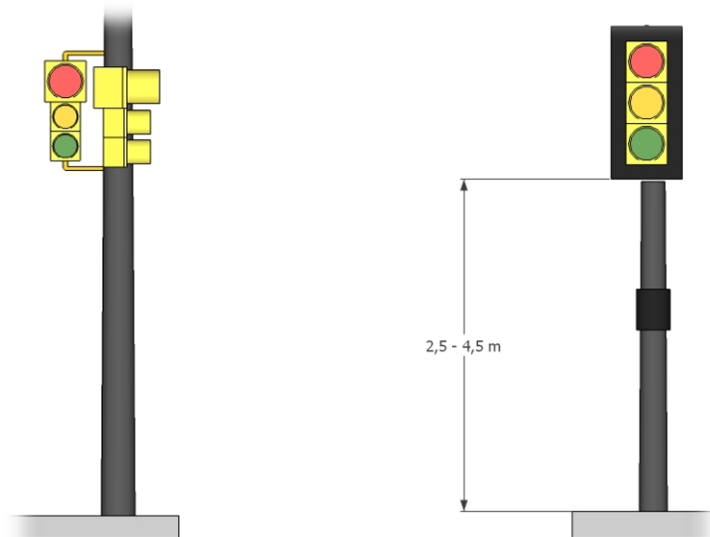
Los semáforos están sostenidos sobre una columna o también llamado soporte, que puede ser de acero galvanizado o de fundición de hierro, que están ubicados a un lado de la vía. Además, existe otro tipo de soporte ubicado en la vía, que siempre son de acero galvanizado y están constituidos por ménsulas largas sujetas a postes laterales, cables de suspensión, postes y pedestales en islas. Los semáforos ubicados en la vía se utilizan para vías donde los vehículos se desplazan a gran velocidad y se necesita que los semáforos tengan visibilidad a una larga distancia.

La placa de contraste, se utiliza para tener una mejor visibilidad de las luces de los semáforos y son colocadas alrededor de las cabezas. Estas van pintadas de color negro mate al igual que la visera, aunque esta además lleva un borde blanco, para conseguir más contraste con el horizonte.⁹

⁹ Manual de señalización vial, Colombia, 2004

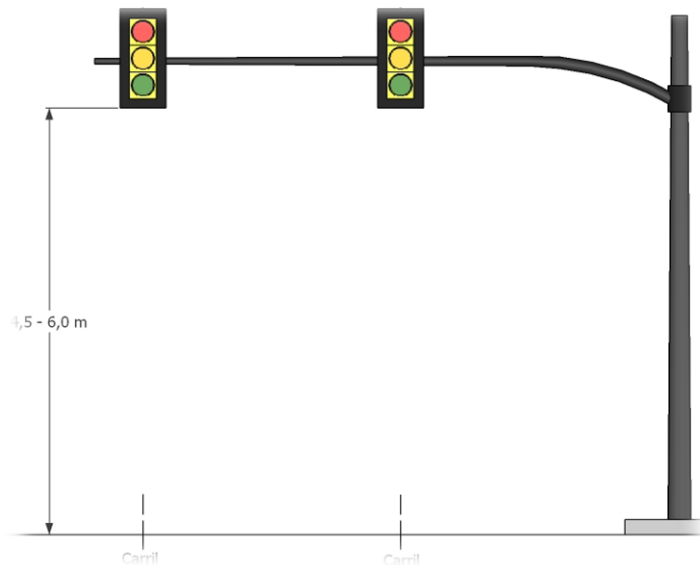
En las figuras 1, 2 y 3 se presenta las diferentes formas en que se pueden encontrar instalados los semáforos en una intersección.

Figura 2. Semáforos montados en postes o en ménsula corta.



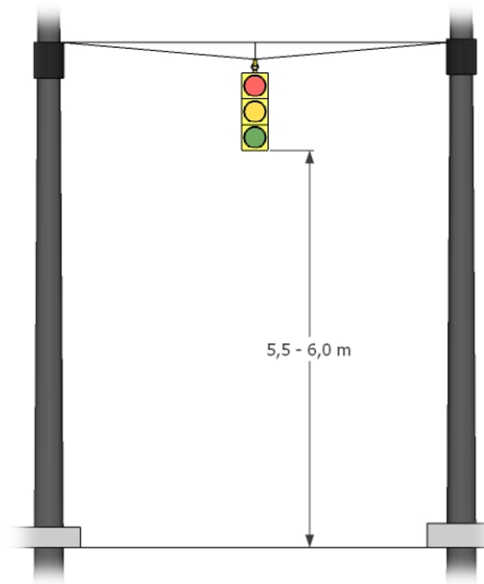
Fuente: Elaboración propia, basada en el Manual de Señalización Vial

Figura 3. Semáforos montados en ménsula larga, sujeta a poste lateral.



Fuente: Elaboración propia, basada en el Manual de Señalización Vial

Figura 4. Semáforo montado, suspendido por cable.



Fuente: Elaboración propia, basada en el Manual de Señalización Vial de Colombia

3.2.2 Ventajas y desventajas de los semáforos

Ventajas: Los semáforos hacen que el tránsito fluya de manera ordenada; aumentan la capacidad vial de las intersecciones si están configurados correctamente; permiten el flujo de tránsito de calles menores a través de arterias mayores y más congestionadas; reducen la frecuencia y gravedad de los accidentes; el uso de semáforos es más económico y eficiente que cualquier tipo de control manual, como el policial.

Desventajas: Causan demoras excesivas por interrupción periódica del tránsito de una corriente vehicular, especialmente tratándose de volúmenes de tránsito pequeños, ocasionando pérdidas innecesarias de tiempo en las horas del día; pueden no ser respetados como señales de tránsito si son instalados donde no son necesarios, con el consecuente aumento de accidentes; igualmente, la mala

configuración de estos ocasión tránsito inducido hacia otras vías que no soportan tránsito adicional.

3.2.3 Significado de las indicaciones del semáforo¹⁰

- **Luz roja:** El tránsito vehicular y peatonal deben detenerse antes de la línea de pare, y si no existe, debe detenerse dos metros antes de la intersección. Y lo contrario pasa con los peatones, estos pueden pasar la vía cuando los vehículos están detenidos en rojo.



 - **Luz ámbar o amarilla:** Advierte a los conductores de los vehículos que el tiempo de rojo o verde se ha terminado y deberán iniciar o detener la marcha respectivamente. Esta señal indica que el conductor debe asumir una conducta de prevención. Para los peatones no se utiliza este color ya que ellos no necesitan tiempo de frenado.



 - **Luz verde:** El tránsito vehicular y peatonal que observen esta luz podrán seguir la marcha de frente o girar a la izquierda o a la derecha según las indicaciones de las flechas, a menos que una señal lo prohíba.
- ↔ **Flechas para giro a la izquierda o a la derecha:** Los conductores de los vehículos girarán a la izquierda o a la derecha, según lo indique la flecha, y de acuerdo con el color que exhiban. El tránsito vehicular que gira en una intersección debe ceder el derecho de vía a los peatones que se encuentren legalmente dentro de la calzada.

¹⁰ Manual de señalización vial, 2004

3.2.4 Tipos de semáforos

Tabla 1. Tipos de semáforos

TIPOS DE SEMÁFOROS	DESCRIPCIÓN	LUZ	ILUMINACIÓN	SIGNIFICADO	
Semáforos reservados para peatones 	Dirige el tránsito de peatones en las intersecciones, se utilizan dos colores: verde y rojo.	Roja	No intermitente	En forma de peatón inmóvil, indica a los peatones que no deben cruzar la vía.	
		Verde	No intermitente	En forma de peatón en marcha, indica a los peatones que podrán cruzar la vía (por los pasos peatonales marcados).	
			Intermitente	El tiempo de que disponen para terminar de atravesar la vía está a punto de terminar, es decir, que se va a encender la luz roja.	
Semáforos circulares para vehículos 	Cumple doble función y simultánea, regula la preferencia entre los flujos vehiculares que confluyen en una intersección, y al mismo tiempo, regulan las preferencias entre los flujos vehiculares y peatonales. Se utilizan los tres colores: rojo, amarillo y verde.	Roja	No intermitente	El tránsito vehicular debe detenerse antes de la línea de PARE y si no la hay, a una distancia de dos metros antes del semáforo.	
			Intermitente o dos luces roja alternativamente intermitente	Indica que los conductores de los vehículos harán un PARE obligatorio y se detendrán antes de la línea de PARE. El rojo intermitente se empleará en el acceso de una vía preferencial y operará como una señal vertical de PARE.	
		Amarilla	No intermitente	Advierte que el periodo de verde asignado a un flujo vehicular ha terminado y está a punto de iniciar el periodo de rojo. No debe ser usado como señal de precaución.	
			Intermitente o dos luces amarillas alternativamente intermitentes	Indica realizar el cruce con precaución y deberá emplearse en la vía que tenga preferencia.	
		Verde	No intermitente	Indica seguir de frente o girar a la derecha, a menos que alguna señal (Reflectiva o preferentemente iluminada) prohíba dichos giros.	
		Flecha negra se ilumina sobre una luz roja no intermitente o sobre una luz amarilla			No cambia el significado de dichas luces, pero lo limita exclusivamente al movimiento indicado por la flecha.
		Flecha verde se ilumina sobre un fondo circular negro			Los vehículos pueden tomar la dirección y sentido indicados por la ésta, cualquiera que sea la luz que esté simultáneamente encendida en el mismo semáforo o en otro

TIPOS DE SEMÁFOROS	DESCRIPCIÓN	LUZ	ILUMINACIÓN	SIGNIFICADO
				contiguo.
Semáforos cuadrados para vehículos o de carril 	Los semáforos de ocupación de carril afectan exclusivamente a los vehículos que circulan por el carril sobre el que están situados dichos semáforos.	Roja	En forma de espira	Indica la prohibición de ocupar el carril sobre el que se encuentra encendida a aquellos vehículos hacia los que está dirigida la luz. Los conductores de los vehículos que circulen por un carril sobre el que se encienda una luz roja de este tipo deberán abandonarlo en el tiempo más breve posible.
		Verde	En forma apuntada hacia abajo	Indica que está permitido circular por el carril sobre el que este encendida. Esta autorización de utilizar el carril no exime de la obligación de detenerse ante una roja circular.
		Blanca o amarilla	En forma de flecha, intermitente o fija, no incorporada a una señal de orientación, colocada encima de un carril y apuntada hacia abajo en forma oblicua.	Indica la necesidad de irse incorporando en condiciones de seguridad al carril hacia el que apunta la flecha, toda vez que aquel por el que circula va a quedar cerrado en corto espacio.
Semáforos reservados a determinados vehículos 		Silueta iluminada de un ciclo		Sus indicaciones se refieren exclusivamente a ciclos y ciclomotores
		Una franja blanca iluminada sobre fondo circular negro	Una franja blanca horizontal iluminada	Prohíbe el paso en las mismas condiciones que la luz roja no intermitente.
			Una franja blanca vertical iluminada	Permite el paso de frente.
			Una franja blanca oblicua, hacia la izquierda o hacia la derecha, iluminada	Indica que está permitido el paso para girar a la izquierda o a la derecha, respectivamente.
			Una franja blanca, vertical u oblicua, iluminada intermitentemente	Indica que los citados vehículos deben detenerse en las mismas condiciones que si se trata de una luz amarilla fija.

Fuente: Temario Específico ESTT - OEP 2005, elaborado en 2003 y Manual de Señalización Vial, 2004

Capítulo 4



Control Semafórico de Tráfico

4 CONTROL SEMAFÓRICO DE TRÁFICO

Los controles de tráfico son implementados con el propósito de reducir o eliminar los conflictos en las intersecciones. Estos conflictos existen debido a que una intersección es un área de uso compartida (DAVOL, Angus P., 2001). Lo cual significa que estos controles regulan el acceso a la intersección. De acuerdo al Manual de Señalización Vial, un control semafórico debe ser instalado, y debe operar, si se satisfacen uno o más de los requisitos o condiciones siguientes:

- Volumen mínimo de vehículos
- Interrupción del tránsito continuo
- Volumen mínimo de peatones
- Movimiento o circulación progresiva
- Antecedentes y experiencia sobre accidentes
- Combinación de las condiciones anteriores

Los valores considerados para estas condiciones, se presenta tabulados y especificados en las siguientes tablas:

Tabla 2. Volumen mínimo de vehículos

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal (Total en ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (Un solo sentido)
Calle principal	Calle secundaria		
1	1	500	150
2 o más	1	600	150
2 o más	2 o más	600	200
1	2 o más	500	200

Fuente: Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD), 2003

Tabla 3. Interrupción del tránsito continuo

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal (Total en ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (Un solo sentido)
Calle principal	Calle secundaria		
1	1	750	75
2 o más	1	900	75
2 o más	2 o más	900	100
1	2 o más	750	100

Fuente: Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD), 2003

Para el caso del control semafórico para peatones, existen dos tipos: una de cruzar la intersección cuando se da tiempo de verde a la vía paralela a su movimiento y otro es la fase exclusiva para peatones.

Una fase exclusiva para peatones debe ser implementada si existe un volumen mínimo de peatones para atravesar la intersección. Los criterios para llevar a cabo una instalación de semáforos para peatones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Criterios para una instalación de semáforos para peatones

DENATRA (1979)		MUTCD (2003)	
Volumen de vehículos en 2 sentidos de la vía	Volumen de peatones en ambos sentidos de la vía	Volumen de peatones en la vía principal durante por lo menos 4 horas del día	Volumen de peatones en la hora pico de la vía
600 (v/h)	250 (peat./h)	100 (peat./h)	190 (peat./h)

Fuente: APARECIDA, Isabela; Investigações no campo da programação semafórica, 2010

Además se debe tener en cuenta que las distancias mínimas establecidas entre pasos peatonales semaforizados o puentes peatonales es de 500 m y que tiene que haber una circulación progresiva de vehículos.

4.1 Orden de implementación de controles semafóricos¹¹

Según la Secretaria Distrital de Movilidad de Barranquilla, la implementación de controles semafóricos, tanto para flujo vehicular como peatonal, implica realizar estudios de ingeniería de tránsito que garanticen un adecuado funcionamiento desde el punto de vista de seguridad y movilidad. Estos estudios comprenden las características físicas y las condiciones del tránsito del sitio y zona de influencia.

Para verificar la necesidad técnica que justifique la inversión de implementar un control semafórico en una intersección, se realiza el siguiente procedimiento descrito en forma general:

- **Conformación de la base de datos:** Se establecen las intersecciones que posiblemente requieren un control semafórico. Una inspección visual técnica determina de manera preliminar la viabilidad de la implementación y se incorpora al listado de intersecciones a estudiar.
- **Toma de información básica:** Con base en el listado definido en el paso anterior, se toma la información de volúmenes vehiculares y peatonales.
- **Verificación y cumplimiento de criterios mínimos:** A partir de la información recolectada, se procede a realizar la verificación para cada una de las intersecciones en lo referente al cumplimiento de los requisitos mínimos establecidos en el CAPITULO 7 MANUAL DE SEÑALIZACION VIAL – DISPOSITIVOS PARA LA REGULACION DEL TRANSITO EN CALLES, CARRETERAS Y CICLORUTAS DE COLOMBIA, preparado por el MINISTERIO DE TRANSPORTE – Resolución N° 1050 del 5 de Mayo de 2004.
- **Priorización:** Con base en el listado de las intersecciones a las que se les realizó el estudio de criterios mínimos para semaforizar y cumplieron con el

² Secretaria distrital de movilidad de Barranquilla

100% de alguno de ellos o con el 80% de dos o más, se realiza una “evaluación zonal” para establecer un orden objetivo de ejecución para la semaforización de las intersecciones, acorde con las necesidades de la ciudadanía y la disponibilidad de recursos económicos de la ciudad. La evaluación zonal consiste el análisis de volúmenes de tránsito, geometría, flujos conflictivos, proximidad a intersecciones semaforizadas, accidentalidad, entre otros.

Una vez se determina la necesidad de ubicar un sistema de semáforos en una intersección vial, se procede a realizar el diseño operativo de este, en el cual, se incluyen: la elección de movimientos permitidos en la intersección, e igualmente, la duración de cada fase establecida.

4.2 Regulación semafórica

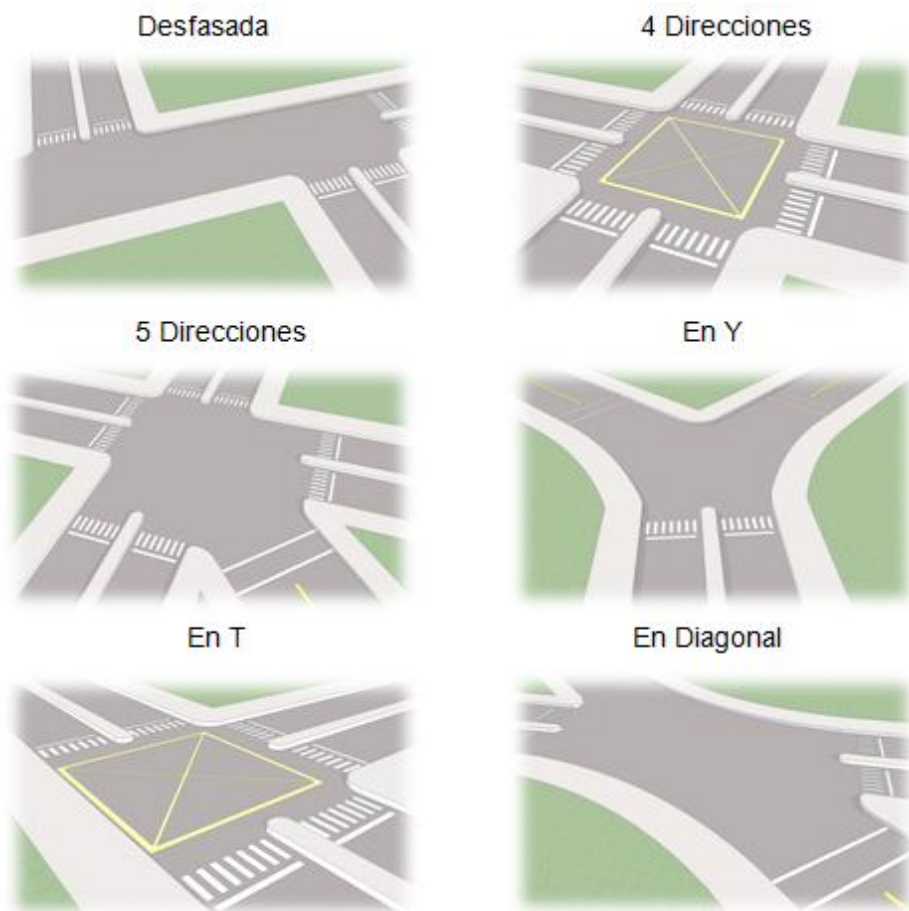
La regulación semafórica es la actividad que gestiona las intersecciones semaforizadas, coordinadas permanentemente o en mayor medida mediante sistemas de luces que determinan las prioridades de paso por la intersección. El uso del control semafórico en una intersección posibilita la optimización en el manejo de flujos, ofrece mejoras en el tema de seguridad de peatones y conductores, e igualmente, representa el apoyo para la elaboración de estrategias de transporte (incentivo al transporte público, priorización de la vía, importancia del peatón, etc.)

Prácticamente, se podría decir que cualquier intersección posee la capacidad en cuanto a infraestructura se refiere, de albergar un sistema de control semafórico. Sin embargo, para el óptimo aprovechamiento de sistemas modernos de semaforización puede ser necesaria la modificación del entorno urbano, lo cual, genera en muchos casos la reestructuración total del espacio público y de sus elementos (andenes, separadores, alumbrado público, etc.).

Cuando la intensidad de tráfico en una intersección es más grande que la que se puede admitir con una regulación de preferencia de paso y no se puede recurrir a un cruce a diferente nivel, la regulación mediante semáforos permite hacer frente a la situación, con un buen nivel de seguridad; con el inconveniente de producir alguna demora a los vehículos que acceden a la intersección.¹²

En la siguiente figura se puede ver los tipos de intersección existentes en una red vial, y de acuerdo a ella y al análisis de flujo presente, se define el derecho de vía a los vehículos.

Figura 5. Tipos de intersección.

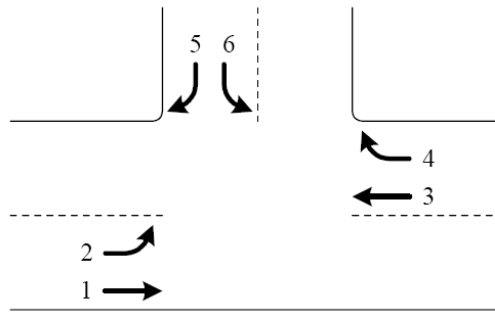


Fuente: Elaboración propia

¹² SÁNCHEZ, Javier; BARBERO, Toscano. Temario Específico ESTT - OEP 2005

Según el tipo de intersección y los posibles movimientos de cada acceso se pueden determinar el número de fases, a continuación se muestra un ejemplo con una intersección tipo T y sus respectivos movimientos.

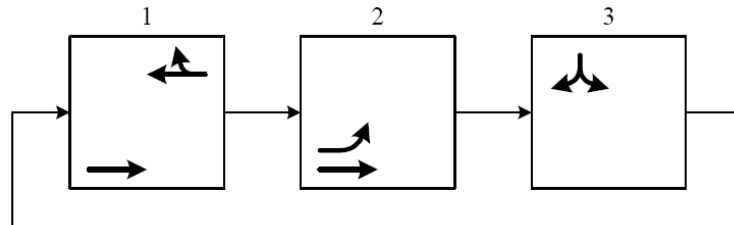
Figura 6. Intersección tipo T



Fuente: Angus P. Davol, Modeling of Traffic Signal Control and Transit Signal Priority, 2001

En este ejemplo se pueden determinar tres fases, de modo que para la fase 1 circularan los movimientos 1, 2 y 4; para la fase 2 los movimientos 1 y 2; y para la fase 3 los movimientos 5 y 6. La suma de los tiempos de cada fase es el ciclo de la intersección y estos tiempos serán proporcionados según el flujo vehicular de cada fase.

Figura 7. Diagrama de fases



Fuente: Angus P. Davol, Modeling of Traffic Signal Control and Transit Signal Priority, 2001

4.3 Sistema operacional de los semáforos¹³

Existen dos tipos de sistemas operacionales de semáforos, uno es un semáforo aislado, el cual es el sistema operacional más simple para los semáforos, ya que no depende de otro sistema para operar. El otro es el semáforo coordinado. En los dos casos cada intersección semaforizada funciona con un controlador que generalmente se encuentra en la acera de una de las esquinas de la intersección.

4.3.1 Semáforo aislado

Como ya se mencionó anteriormente, es el más sencillo, ya que este no cuenta con conexión a otro semáforo o sistema que controle su funcionamiento. El semáforo aislado funciona mediante órdenes internas a través de un reloj interno, que programa o hace cambio de planes, mediante pulsos eléctricos; si existen fluctuaciones en la electricidad afectara el comportamiento del semáforo generando también esas fluctuaciones en el reloj.

4.3.2 Semáforos coordinados

Los semáforos coordinados son aquellos que operan con el mismo ciclo o múltiplo de este, en los diferentes planes definidos para la operación de este. Para que exista una coordinación de semáforos no es necesario que ellos estén conectados físicamente entre sí, ellos pueden estar conectados mediante sincronismos cumpliendo las condiciones básicas para su funcionamiento, pero al no existir conexión física hay posibilidad que la red no funcione correctamente debido a interferencias en la red eléctrica.

¹³ PAVEZ A., Claudio, "Estimación de costos operacionales producto de eventos de falla en una red de semáforos: aplicación caso La Serena y Coquimbo", Universidad de Chile, 2007

Para formar una red mediante conexión física se utilizan cables de sincronismo, donde existe un semáforo principal que envía pulsos a los otros semáforos para el inicio del ciclo, y además, se debe asegurar que los desfases entre ellos sea el correcto.

Figura 8. Ejemplo de intersección aislada y coordinada con control local y central respectivamente.



Fuente: Elaboración propia

Existen sistemas de control de programas pre-sincronizados y actuados por el tránsito que pueden actuar aislados o coordinados, pero es difícil encontrar semáforos accionados por tránsito y coordinados, pero pueden encontrarse semi-actuado y coordinados. A continuación se explica el funcionamiento de estos sistemas.

4.4 Sistemas de control de tráfico

Los sistemas de control semafórico son sistemas que coordinan señales individuales de tráfico, para conseguir ciertos objetivos operacionales en una red urbana. Estos sistemas integran los siguientes componentes básicos: las intersecciones semaforizadas, una red de comunicaciones para permitir el envío o intercambio de información y un computador central, o una red de computadoras, para gestionar el funcionamiento de todo el sistema.

❖ Tipos de conexiones para generar una red semafórica

Para generar una red semafórica existen tres tipos de conexión los cuales son definidos a continuación:

- **Punto a punto:** En este caso cada semáforo de la red está conectado directamente con el semáforo principal.
- **Multipunto:** Existe una única conexión entre dos semáforos, y desde el semáforo principal se envía el pulso que viaja por la red en forma análoga a un río.
- **Control distribuido:** Es una condición intermedia entre el sistema punto a punto y multipunto.

4.4.1 Sistema de control pre-sincronizado o de tiempo fijo

Es el tipo de lógica de control más básico que puede ser implementado. En el control pre-sincronizado, la duración del ciclo y la división de fases se establecen en valores fijos, al igual que la duración de cada intervalo en cada fase. Los datos históricos de flujo se utilizan normalmente para determinar los valores adecuados para estos parámetros. El atributo clave del control previamente sincronizado, es que el parámetro no es la demanda, lo que significa que las señales operan sin tener en cuenta las fluctuaciones en la demanda de tráfico¹⁴.

“Un sistema de control de tiempo fijo dispone de planes diferentes para la mañana, tarde, noche, picos de tráfico y fines de semana. Resulta bastante común que existan también planes para condiciones nocturnas y para acontecimientos específicos tales como procesiones o eventos deportivos. Si la red urbana posee un equipamiento de detección de vehículos aislados entonces el sistema puede cambiar su modo de funcionamiento a ser reactivo al paso de estos vehículos (sobre todo en condiciones de flujo de tráfico ligero o bien porque exista algún fallo de conexión entre los reguladores y el computador central de tráfico). Sin embargo, tales sistemas no suelen ser utilizados debido a su escaso beneficio relativo a costo/vehículos implicados.”¹⁵

Uno de los principales modelos desarrollados para realizar el cálculo de los planes de señales disponibles, es el sistema TRANSYT.

¹⁴ Angus P. Davol. Modeling of Traffic Signal Control and Transit Signal Priority Strategies in a Microscopic Simulation Laboratory, 1997

¹⁵ GARCÍA FERNÁNDEZ, Luis Amable, Diseño e Implementación de una Arquitectura Multiagente para la Ayuda a la Toma de Decisiones en un Sistema de Control de Tráfico Urbano, 2000:35

4.4.1.1 El Modelo TRANSYT¹⁶

El modelo TRANSYT (TRAffic Network StudY Tool) es una herramienta computacional que proporciona soluciones de optimización de redes semafóricas de una malla vial urbana a través de la simulación, en la cual, se permite elaborar y modificar la programación de las intersecciones semaforizadas, y de esta manera determinar la configuración optima de cada semáforo.

El programa modela el comportamiento del tráfico, realiza mecanismos de optimización y predice qué asignaciones son las mejores para cada señal. Igualmente suministra información exhaustiva sobre las prestaciones de la red, incluida: retrasos estimados, número de paradas, velocidades medias en rutas y consumo de combustible. (GARCIA FERNANDEZ, 2000: 35)

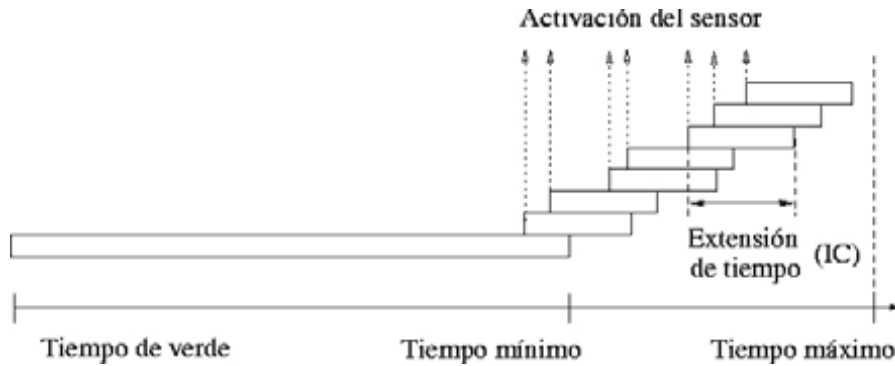
4.4.2 Sistema de control actuado

Utiliza como variable la demanda de tráfico para controlar tiempos de señal, con la duración de las fases establecidas, registrado por los detectores en los accesos a la intersección. La característica más común del control accionado es la capacidad de extender la duración del intervalo de luz verde para una etapa particular. El intervalo puede ampliarse, por ejemplo, cuando un vehículo se acerca a una señal que está a punto de cambiar a amarillo, permite que el vehículo pase a través de la intersección sin detenerse.

Existen tres tipos de controladores actuados: semiactuados, completamente actuados y de volumen/densidad.

¹⁶ GARCÍA FERNÁNDEZ, Luis Amable, Diseño e Implementación de una Arquitectura Multiagente para la Ayuda a la Toma de Decisiones en un Sistema de Control de Tráfico Urbano, 2000

Figura 9. Esquema representativo de la fase actuada.



Fuente: Traffic Control Systems Handbook, 2005

4.4.2.1 Controladores Semiactuados¹⁷

Un controlador semiactuado es aquel que tiene una o más fases con un tiempo fijo y una o más fases actuadas. Este funcionamiento consiste en programar siempre la operación de la vía principal en la fase verde, pero con un ciclo de fondo, de modo que si en la calle secundaria se detecta flujo vehicular, el ciclo de fondo se activa, hasta satisfacer la demanda de esta vía; pero, si en la calle secundaria un vehículo es detectado para producir una actuación y el ciclo de fondo dice que el semáforo debe permanecer verde para la calle principal (rojo para la calle secundaria); el vehículo en la calle secundaria debe esperar hasta que finalice el verde para la calle principal y empiece el verde para la calle secundaria, respondiendo de este modo a la demanda de la calle secundaria. Si el vehículo llega cuando el ciclo de fondo dice rojo para la calle principal, obtiene el paso inmediatamente, pero si el tiempo no es el suficiente para poder atravesar la intersección, el vehículo de la calle secundaria debe esperar hasta que el verde retorne nuevamente para esta vía según el ciclo de fondo.

¹⁷ SEDESOL, "Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito"; Programa de Asistencia Técnica en Transporte Urbano para las Ciudades Medias Mexicanas.

Los controladores semiactuados tienen las siguientes características:

- Se usan en intersecciones con una calle de volúmenes altos y otra con volúmenes bajos.
- Se colocan detectores en uno o más accesos, pero no en todos.
- Se garantiza la asignación de un tiempo mínimo para la calle principal, la asignación de tiempos en la calle menor está basada en los ajustes de las especificaciones para controladores actuados.
- Tienen el costo más bajo de todos los controladores actuados, a pesar que la diferencia entre semiactuado y actuado completo es muy pequeña.

4.4.2.2 Controladores Completamente Actuados

En el control totalmente actuado, el ciclo, la duración y la secuencia de intervalos están controlados por el tráfico real de la intersección, de modo que todas las fases son actuadas y todos los movimientos requieren detección. Este tipo de control generalmente se utiliza en intersecciones aisladas; sin embargo, puede también ser usado en intersecciones con mucha demanda y en intersecciones con sistemas coordinados¹⁸.

Según el Manual de Estudios de Ingeniería de Transito (SEDESOL, México), los controladores completamente actuados tienen las siguientes características:

- Se prefiere su uso en intersecciones donde el tránsito sea similar en todos los accesos.
- Se colocan detectores en todos los accesos.

¹⁸ SALCEDO V., Juoy. Sistema de Monitoreo de Tráfico y Control de Intersecciones para el Laboratorio de Ingeniería de Transportación, 2009

- Los ajustes de tiempo para el controlador se hacen para los siguientes intervalos:
 - Intervalo Verde Mínimo: Tiempo necesario para desalojar la cola de vehículos entre el detector y la línea de alto.
 - Extensión: Tiempo de paso entre el detector y la línea de alto.
 - Intervalo Verde Máximo: El tiempo más largo que es aún práctico.
 - Amarillo o tiempo de desalojo.
 - Intervalo todo Rojo: Es usado sólo en casos especiales cuando un intervalo amarillo de cinco segundos no sea suficiente para el desalojo de la intersección.

4.4.2.3 Controladores de Volumen Densidad (Adaptativo)

Se le considera como una forma superior de control totalmente actuado. Este tipo de control tiene la habilidad para determinar la duración de verde mínimo basada en la demanda real (detecciones durante el intervalo de rojo). Con este controlador se consigue una mejor reducción de las demoras y la máxima eficiencia de movimiento vehicular. La operación volumen/densidad toma en cuenta los volúmenes instantáneos de tránsito, la densidad y el tiempo de espera consumido en cada fase. Este control también es útil para interconectar una intersección con un sistema progresivo de tiempo fijo o semiactuado, cuando hay dificultades por distancias o por altos volúmenes (SALCEDO V., Juoy, 2009).

Según el Manual de Estudios de Ingeniería de Transito (SEDESOL, México), los controladores de Volumen/Densidad tienen las siguientes características:

- Se usan en intersecciones con flujo de transito mayores y que tengan fluctuaciones impredecibles.
- Son bastante complejos.
- Se colocan detectores en todos los accesos.

- Los principios básicos de un controlador Volumen/Densidad que funcione en dos fases son: la evaluación constante y automática de la demanda para el derecho de paso de vehículos que se muevan en el intervalo de verde, y la acumulación de la demanda para el derecho de paso por parte de los vehículos que esperan en rojo en el acceso conflictivo.
- Los ajustes de tiempo son bastante complejos. Catorce tipos de ajustes evalúan constantemente la demanda para el derecho de paso.
- Ese tipo de controlador es el más caro del mercado.

Actualmente, se dispone de diferentes sistemas de control adaptativo, cada uno con sus ventajas y desventajas; sin embargo, todos orientados en la misma dirección: la optimización del tráfico en tiempo real.

SCOOT (*Split Cycle Offset Optimisation Technique*), es un sistema de control adaptativo que coordina la operación de todas las señales de tráfico en un área, para dar mejor progresión a los vehículos a través de la red. Mientras coordina todas las señales, este responde inteligente y continuamente como los cambios de flujo de tráfico y fluctúa a través del día. Elimina la dependencia de sistemas menos sofisticados en planes de señales, los cuales tiene un alto costo de actualización (SCOOT Website).

Otro sistema de control adaptativo es el OPAC (*Optimization Policies for Adaptive Control*), el cual es una estrategia de control distribuido con un algoritmo de optimización dinámico que calcula los tiempos de señales, para reducir al mínimo la función de rendimiento de retraso total y parada de la intersección. El algoritmo usa medidas, así como, modelos de demanda para determinar la duración de las fases que son limitadas por los tiempos de verde mínimo y máximo, y, si se ejecuta en modo coordinado, la longitud de ciclo y desfase que serán actualizados basados en datos en tiempo real (GARTNER, N.H. et al., 2001).

Igualmente, se encuentra el sistema de control UTOPIA (*Urban Traffic Optimization by Integrated Automation*), el cual, es ampliamente considerado como el más avanzado sistema de control adaptativo de señales de tráfico disponible en todo el mundo que ha sido implantado con éxito en muchos lugares en Europa. La capacidad de procesamiento a nivel de la intersección permite una respuesta rápida a los volúmenes de tráfico en esta. Esto hace a UTOPIA ideal para el control de tráfico flexible y prioridad para el tráfico específico identificado, como los vehículos de servicio público.

Lo que hace importante a este sistema de control es la capacidad de predicción, UTOPIA estima cómo la situación del tráfico se desarrollara y calcula la mejor estrategia posible. La mejor estrategia está basada en lo que es llamado como “función de costo”. La función de costo mide cuestiones como el tiempo de retardo, el número de paradas y los requisitos específicos de prioridad. Teniendo en cuenta el efecto de las intersecciones adyacentes, el control distribuido es optimizado para cada intersección en la red. Todas las intersecciones comunican el flujo de tráfico esperado en las intersecciones vecinas, lo que permite una predicción en línea (*Peek Traffic*, 2010).

4.5 Escenarios de control

Los escenarios de control corresponde a la estructura física y funcional del espacio en el que serán ubicados los equipos de control. De acuerdo a sus características se presentan tres tipos:

4.5.1 Intersección aislada

El control en una intersección aislada es una estrategia de control en la cual las señales para una intersección, son manejadas sin considerar las señales adyacentes. Es decir, cada intersección presenta el tiempo más acorde para sus

Con controles de tiempo fijo, la coordinación arterial se establece asignando el mismo tiempo de ciclo a todos los semáforos, e igualmente, estableciendo un tiempo de desfase preciso entre semáforos para asegurar la continuidad en el flujo. Esta combinación de tiempo fijo y desfase permite lo que generalmente es conocido como “ola u onda verde”.

Sobre un control actuado opera similarmente a uno sobre control de tiempo fijo, sin embargo, sobre el control actuado se presenta mayor flexibilidad de ajuste, ya que permite saltarse o extender un tiempo de verde o rojo, para dar prioridad a un determinado flujo. Ahora, sobre un control adaptativo se presenta mayor beneficio, puesto que permite optimizar medidas tales como: tiempos de viaje y paradas a nivel de todo el corredor y no a nivel de una sola intersección. De manera que se puede implementar estrategias de control más eficientes, por ejemplo, anticipar la demanda vehicular en una intersección a partir de la información suministrada por la intersección anterior o la siguiente.

4.5.3 Control en red

Presenta el alcance más amplio de las estrategias de control, ya que considera el rendimiento de la red como un conjunto en la implementación del control de la señal. Se podría decir que el control en red es una extensión de la coordinación arterial, que considera avance en todas las direcciones de viaje. Un ejemplo donde el control en red puede ser efectivo, es una red vial urbana, en la cual, muchas veces no todos los sentidos de flujo son dominantes. En este sentido, un control de tiempo fijo o coordinado en red podría fácilmente proporcionar un control restringido a ciertos sentidos, sin embargo, un control adaptativo permitiría una configuración óptima en la que todos los sentidos de la red estén coordinados. No obstante, esta optimización requiere de grandes costos computacionales, por lo cual este control no se encuentra actualmente muy implementado.

Tabla 5. Lógicas de control

		Escenario de control		
		Aislada	Arterial	Red
Tipo de control	Tiempos fijos	✓	✓	✓
	Actuados	✓	✓	✓
	Adaptativos	✓	✓	✓

Fuente: Angus P. Davol, Modeling of Traffic Signal Control and Transit Signal Priority, 2001

En la figura anterior se presenta en resumen las combinaciones que se pueden presentar entre tipos de control y los escenarios en los que se puede utilizar. Los tipos de control, específicamente corresponde a cómo el controlador responde a las condiciones del tráfico local; y los escenarios de control, representa sobre qué área la estrategia es aplicada.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los Sistemas de Control de Tráfico.

SISTEMAS DE CONTROL DE SEMÁFOROS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TIEMPO FIJO	<ul style="list-style-type: none"> • Probado • Flexible • Equitativo • Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de Calibración • No optimiza el flujo vehicular • Puede agravar situaciones de congestión
ACTUADOS / SEMI - ACTUADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Se adapta a condiciones de tráfico cambiantes • Flujos mayores que con sistemas tradicionales • Aumenta la capacidad con la extensión de verde 	<ul style="list-style-type: none"> • No sirven en congestión • Requiere de sensores • En ciertas condiciones son inferiores a los sistemas de tiempo fijo • Costos de instalación mayores • Requieren mantenimiento específico.
ADAPTATIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • Se adapta a condiciones de tráfico cambiantes • Altos flujos en situaciones normales • Pueden dar prioridad a ciertos vehículos 	<ul style="list-style-type: none"> • Menores flujos en congestión • Requiere sensores • En ciertas condiciones no son mejores que los sistemas tradicionales • Alto costo

Fuente: Elaboración propia. Basada en Zarate A, Ricardo R., Método para obtener planes semafóricos, 2009

4.6 Detectores para el control de tráfico

El tema de detectores está basado en las siguientes fuentes bibliográficas: Salcedo Valeriano (2009), Botero García (2008), Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor en Calles y Carreteras, Lima (2001).

Establecer con precisión el comportamiento de los flujos vehiculares es uno de los problemas con los que se enfrenta el control de tráfico. Para poder simular de manera aproximada las condiciones en las vías se recurren a conteos e inspecciones visuales que requieren de gran cantidad de personal, el cual, no asegura la total exactitud de los datos. Sin embargo, para facilitar y mejorar esta situación, es posible hacer uso de tecnologías que automatizan dichos procesos con un mayor grado de exactitud.

La implementación de sistemas inteligentes para regular el tráfico se basa en la utilización de detectores (todo control actuado requiere de detectores) ya que estos ajustan las operaciones del semáforo de acuerdo con las demandas de flujo de tránsito detectadas. El detector tiene la capacidad de registrar y enviar señales al controlador de los cambios que se producen de forma automática y este último ajusta las fases de acuerdo a la demanda de tránsito. Los detectores pueden instalarse de dos formas: detectores dentro de la calzada y detectores sobre la calzada.

4.6.1 Detectores vehiculares

Los detectores vehiculares pueden instalarse de dos formas: detectores dentro de la calzada y detectores sobre la calzada.

4.6.1.1 Detectores dentro de la calzada

Los detectores dentro de la calzada son aquellos que pueden ser instalados por dentro del pavimento de la carretera, por debajo de la carretera (subrasante) y sobre la superficie de la carretera. Dentro de este tipo de detectores se encuentran:

❖ Lazos de inducción

Es el tipo de detectores más utilizados en las vías. Se basa en emplear las características de un lazo magnético situado sobre la superficie de la carretera y las fluctuaciones eléctricas producidas por la aproximación de un objeto metálico (en este caso el vehículo) para detectar la presencia y el paso de estos.

❖ Espiras magnéticas

Son precisas pero sólo detectan la presencia de un vehículo. Es necesario instalar un conjunto de espiras para poder contar varios vehículos. Sin embargo su instalación es cara e invasiva ya que requiere instalar demasiado cableado y cortar el tráfico para su instalación.

4.6.1.2 Detectores sobre la calzada

Los detectores sobre la calzada son aquellos que pueden ser instalados sobre la carretera individualmente o a lo largo de la carretera paralelo al carril de tráfico.

Los detectores de este tipo son:

❖ Detectores Microondas de radar

Constan de un aparato emisor y otro receptor de ondas electromagnéticas y generalmente se suspenden sobre la vía o se colocan lateralmente a ella. En la actualidad se emplean dos tipos de detectores de radar de microondas en las aplicaciones de gestión de tráfico. El primero transmite energía electromagnética a una frecuencia constante midiendo la velocidad de los vehículos dentro de su campo de visión usando el principio de Doppler, en el que la diferencia entre las señales transmitidas y recibidas es proporcional a la velocidad del vehículo. Por lo tanto, la detección de una variación en la frecuencia denota el paso de un

vehículo. Este tipo de sensor no puede detectar vehículos parados, y por lo tanto, no es adecuado para aplicaciones que precisan detectar la presencia de vehículos tales como regulación de semáforos o líneas de parada obligatoria.

El segundo tipo de detector de radar de microondas transmite una onda en forma de diente de sierra, también denominada onda continua modulada en frecuencia, que varía la frecuencia transmitida de forma continua en el tiempo. Los vehículos parados se detectan midiendo el rango desde el detector hasta el vehículo y también calculando la velocidad del vehículo midiendo el tiempo que le lleva al vehículo viajar entre dos marcas internas que representan distancias conocidas para el radar. Al disponer de la característica de detección de vehículos parados, este detector suele denominarse radar de microondas de presencia real.

❖ Pasivo de Infrarrojo

Este tipo de dispositivo es capaz de detectar el paso y la presencia de vehículos pero no su velocidad. Su método de funcionamiento se basa en un detector sensitivo a la energía de fotones colocado en un plano focal para medir la energía infrarroja emitida por los objetos en el campo de visión del detector. Los detectores pasivos no transmiten energía por sí mismos. Cuando un vehículo entra en la zona de detección produce un cambio en la energía medida normalmente desde la superficie de la vía en ausencia de vehículos. El cambio en la energía es proporcional a la temperatura absoluta del vehículo y la emisividad de la superficie metálica del vehículo. La diferencia de energía que es capaz de detectar este detector se reduce ante condiciones meteorológicas adversas (lluvia, nieve, aire, etc.).

❖ Activos de Infrarrojos

Su funcionamiento es similar al de los detectores de radar por microondas. Los más comunes utilizan un diodo láser para emitir energía en el espectro cercano al infrarrojo, una porción del cual vuelve al receptor del detector desde el vehículo de su campo de visión. Los detectores basados en el radar laser pueden suministrar la presencia, el paso y la velocidad de vehículos. La medición de la velocidad se realiza anotando el tiempo que le lleva a un vehículo cruzar dos haces de infrarrojos que están ubicados a una distancia conocida. Algunos de estos detectores son capaces de clasificar los vehículos contrastando las mediciones con unos ficheros modelos.

❖ Ultrasónicos

Son también de bajo coste de instalación. Los detectores ultrasónicos emiten sonidos a una frecuencia entre los 25 KHz a los 50 KHz (según sea el fabricante). Una porción de la energía transmitida se refleja desde la carretera o la superficie del vehículo, de nuevo al detector y se procesa para dar el paso y presencia de vehículos; un detector típico de presencia ultrasónico emite energía en forma de pulsos. El tiempo que le lleva al pulso dejar el detector, chocar con la superficie y regresar al detector es proporcional al rango del detector a la superficie. Cuando un vehículo se introduce en su campo de visión se mide el rango desde el detector hasta el vehículo, obteniéndose un rango menor que el producido sobre la vía lo que produce en el detector una señal de detección de vehículo. Este tipo de detectores no son capaces de detectar vehículos a larga distancia y por tanto no pueden detectar los vehículos cuando se están aproximando y tomar la decisión óptima para los próximos instantes.

❖ Procesadores de imágenes de video

Estos detectores identifican los vehículos y sus parámetros de flujo de tráfico asociados mediante el análisis de las imágenes suministradas por cámaras de video. Estas imágenes se digitalizan y se analizan para identificar los cambios observados entre imágenes sucesivas; es decir, los cambios de los niveles de contraste entre píxeles adyacentes. Por lo tanto estos detectores pueden suministrar información sobre el paso, presencia, velocidad, longitud y cambios de carriles de vehículos según sea el tipo de técnica de procesado de imágenes utilizada.

4.6.2 Detectores de peatones

Así como los detectores para registrar la demanda de vehículos que se aproximan a una intersección, de igual forma es importante disponer de dispositivos para detectar la presencia de tránsito de peatones. En este tipo de detectores se utilizan unas teclas o botones los cuales son accionados al haber una demanda de peatones, este accionamiento lo realizan únicamente personas autorizadas, para el buen manejo de estos.

4.6.3 Detectores para vehículos de emergencia

Estos detectores son especiales, funcionan mediante un control remoto instalado en los vehículos de emergencia y se activan únicamente al accionamiento de estos. Los detectores en los vehículos de emergencia actúan con ondas de radio equipados con un receptor de alta frecuencia y un condensador de frecuencia fija preestablecida, con un dispositivo que convierta la señal emitida desde el vehículo de emergencia en pulsaciones eléctricas y las transmitidas a la unidad de control. Es de vital importancia que el quipo instalado contenga filtros necesarios para evitar interferencia.

El control remoto que se instala en los vehículos de emergencia es un aparato de alta frecuencia capaz de transmitir ondas de radio con una frecuencia fija preestablecida que con el solo accionar de un botón transmite dichas ondas al detector.

La distancia con respecto a la intersección a la que deberán quedar instalados los detectores se determinará de acuerdo a los resultados del estudio de tiempos de recorrido. Quedarán debidamente protegidos de las diferentes condiciones climáticas así como del vandalismo.

Capítulo 5



SISTEMAS DE PRIORIDAD SEMAFÓRICA

5 SISTEMAS DE PRIORIDAD SEMAFORICA

Día a día las calles y carreteras de las ciudades reciben un mayor número de vehículos a medida que la población aumenta; e igualmente con esta, la necesidad de transportarse. En base a esta situación, actualmente, en el mundo se ha hecho necesario y de gran importancia el mejoramiento de los servicios de transporte público desde el punto de vista de la movilidad; con el fin de incentivar su uso como alternativa para movilizarse. La movilidad en entornos urbanos no se puede concebir sin la participación de los sistemas de transporte colectivo y en especial los de superficie (Cañelles, David S., 2009).

Entre todas las dificultades que se presentan para elaborar estrategias en pro de mejorar el transporte público, la que presenta menos opciones de solución es: el hecho de utilizar las vías como espacio común para los dos sistemas de transporte –público y privado-, sobre todo, en ciudades donde la infraestructura vial no proporciona mayores ventajas.

Ahora bien, estas dificultades no son limitantes para ver el transporte público como un medio próspero y que presenta beneficios y ventajas respecto a otros medios de transporte, sobre todo, si se consideran los “Sistemas de Prioridad Semafórica” actuales, que están orientados a proporcionar como su nombre lo dice prioridad “tiempo de verde”, en el paso vehicular por intersecciones con control semafórico.

Se considera como “Prioridad” la actividad de modificar el funcionamiento normal de un control semafórico con el objetivo de dar el derecho de vía en una intersección a un determinado flujo de vehículos, e igualmente, a un flujo de peatones; retornando a este funcionamiento normal cuando el flujo con prioridad haya pasado. A diferencia de la “Prelación”, la cual consiste en dar preferencia a un flujo, sin modificar el funcionamiento normal del sistema; que debe ser atendido

inmediatamente por su importancia, es el caso de los vehículos de emergencia (bomberos, ambulancia, policía, etc.).

El renovado interés en el uso de sistemas de priorización del tráfico se debe a factores tales como: el aumento en la congestión en arterias y vías locales; la imposibilidad de aumentar la capacidad de las vías; la implementación de sistemas de transporte y los constantes avances en la tecnología.

Si bien estos sistemas ofrecen prioridad al transporte público, este último debe estar ajustado a ciertos parámetros o elementos básicos que permitan que sea efectivo la priorización; es decir, un sistema de transporte público debe ser regulado, integrado y de frecuencias ajustadas, que permita al servicio de priorización actuar correctamente, por ejemplo, el transporte masivo presenta frecuencias de viaje establecidas y no hay saturación de flota en las vías, lo cual favorece dicha priorización.

En sí, las estrategias de priorización buscan reducir las demoras de los vehículos de transporte público en las intersecciones semaforizadas. La razón de esta consideración especial, está fundamentada en la gran capacidad que dicho sistema presenta (DAVOL, Angus P., 2001). La demora para un bus con ochenta pasajeros no es comparable con un vehículo que transporta tres personas, bajo esas premisas se justifican los sistemas de priorización.

La priorización de señales de tráfico se puede dividir en dos sistemas: Sistemas pasivos y sistemas activos.

5.1 Sistemas Pasivos de Prioridad Semafórica

Los sistemas pasivos de prioridad semafórica no requieren de inversión en software y hardware de prioridad activos y adaptativos. Están basados en

controladores de tiempo fijo siendo estos sincronizados de acuerdo a las rutas, los tiempos que tardan en las paradas y de los posibles obstáculos, para que en su trayecto encuentren todos los semáforos en verde. Tienen la ventaja de ser muy sencillos y que no requieren de tecnología. Además reducen al máximo el consumo de combustible y tiempo de viaje para los usuarios del servicio.

5.2 Sistemas activos de prioridad semafórica

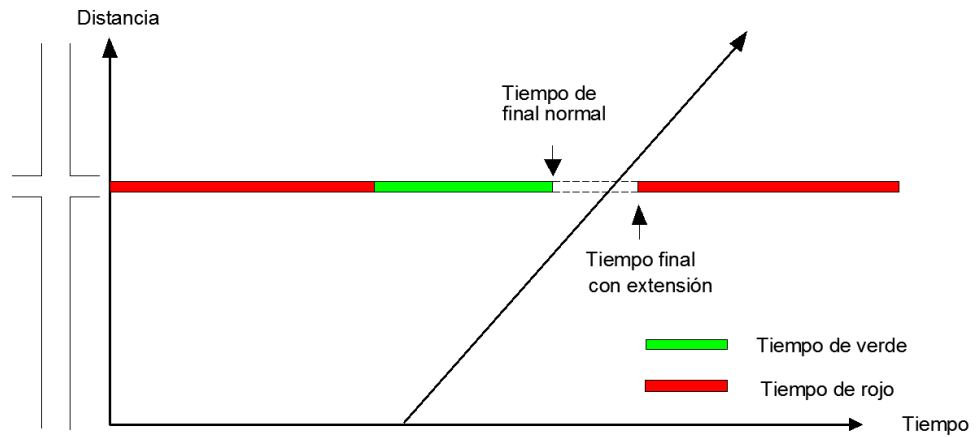
Las estrategias activas de prioridad brindan un tratamiento prioritario al transporte de servicio público mediante la detección de ellos. Se debe contar con un detector (receptor) y un emisor dentro del autobús, de modo que cuando el autobús se está acercando a la intersección al ser accionado el emisor pueda enviar la información al detector, para que puedan ser modificadas las fases del semáforo para que el autobús pueda atravesar la intersección sin necesidad de detenerse.

La modificación del sistema puede llevarse a cabo mediante las siguientes estrategias:

5.2.1 Extensión de verde (*green extension*):

La estrategia de este sistema consiste en extender el tiempo de verde de modo que el autobús pueda pasar la intersección sin necesidad de detenerse. Esta estrategia solo se aplica cuando la señal es de color verde al acercamiento y la extensión no debe ser tan larga para que los vehículos que están en espera en la vía perpendicular no sean afectados. Este sistema es uno de las eficaces, ya que la reducción de tiempo de viaje es considerable y además no necesita de tiempos de despeje ni de espera para otra fase de verde.

Figura 11. Esquema de actuación de extensión del verde



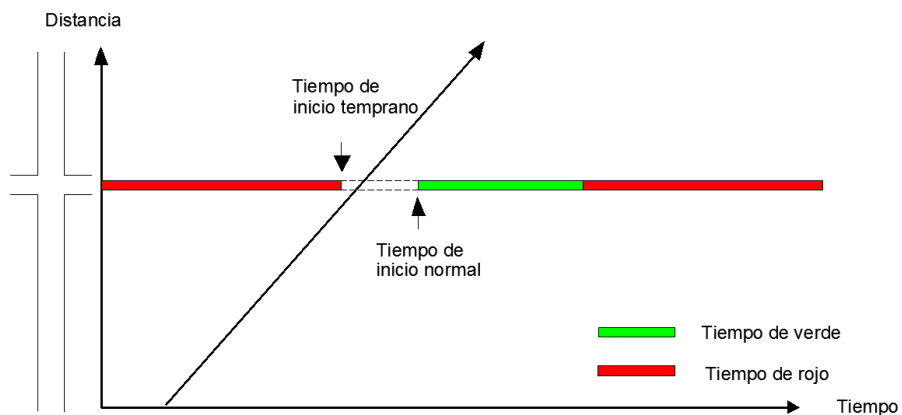
Fuente: Cañelles, David S., Análisis operativo y medioambiental de los sistemas de prioridad semafórica. Figura modificada.

5.2.2 Truncado de rojo (*early green*):

Esta estrategia reduce el tiempo de rojo para la fase que está activa. Solo se aplica cuando la señal es de color rojo para el acercamiento del vehículo.

Las aplicaciones de extensión de verde y truncado del rojo pueden ir juntas en un sistema, pero no se deben aplicar a la vez.

Figura 12. Esquema de actuación truncado de rojo

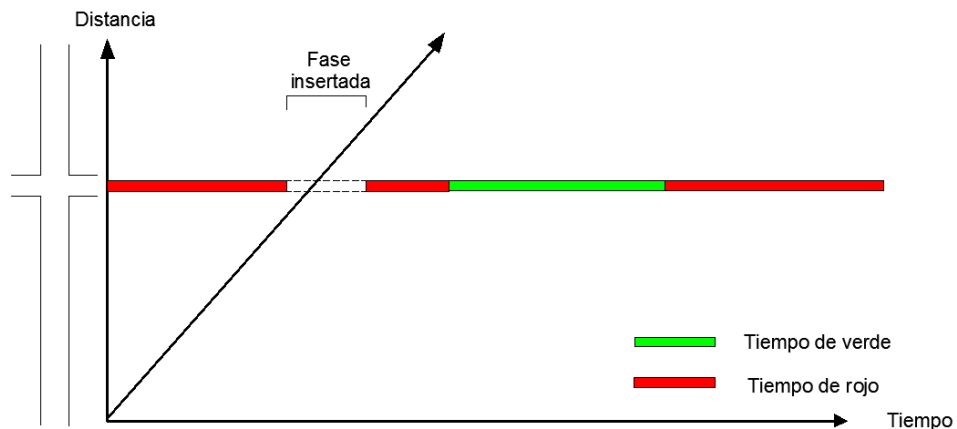


Fuente: Cañelles, David S., Análisis operativo y medioambiental de los sistemas de prioridad semafórica. Figura modificada.

5.2.3 Fase actuada (*extra stage*):

Se basa en introducir una fase corta de color verde entre dos fases de rojo de modo que cuando el autobús se acerque a la intersección pueda cruzarla. Un ejemplo de esta técnica para que sea efectiva, sería un carril exclusivo para vuelta a la izquierda para vehículos de transporte público sin que pueda afectar tanto al resto del tráfico.

Figura 13. Esquema de actuación de fase actuada



Fuente: Cañelles, David S., Análisis operativo y medioambiental de los sistemas de prioridad semafórica. Figura modificada.

5.3 Sistemas en tiempo real

Estos son sistemas sofisticados y complejos, no son muy comunes hoy en día, pero posiblemente pueden ser la ola del futuro. Tienen en cuenta tanto al transporte público como al resto del tráfico, ajustando los planes de forma dinámica. Este tipo de sistema al igual que los activos requiere de un receptor ubicado en las cercanías de la intersección y un emisor ubicado dentro de los vehículos. El sistema evalúa tanto las funciones de los retrasos de los autobuses como el de los otros vehículos y modifica el ciclo y las fases del plan semafórico existente.

5.4 Beneficios y costos

Varios beneficios se pueden adelantar a partir de la implementación de los sistemas de priorización de tránsito, generalmente incluye: mejoras en los horarios del servicio de transporte público, reducción de los tiempos de viaje, reducción en las paradas de los buses en las intersecciones semaforizadas, reducción de emisiones de gases contaminantes; y los más importante que se debe considerar, el incremento en el atractivo del transporte público como medio de transporte, en oposición al uso individual del vehículo particular.

En Latinoamérica no ha habido una política de uso de estos sistemas, a diferencia de Europa que ha implementado los sistemas de priorización desde 1968, y que en cierta manera debido a sus políticas agresivas en este tema, se han obtenido reducciones de tiempos de viaje de buses de 6 a 42%, con solamente un incremento de 0.3 a 2.5% en los tiempos de viaje de los vehículos particulares.¹⁹

Por otra parte, desafortunadamente, existe una limitada cantidad de datos antes y después de la implementación de los sistemas de priorización, resultado de una pequeña cantidad de casos de estudio. Estas falencias han tenido que ser enfrentadas a través de modelos de simulación, que si bien arrojan resultados confiables, no corresponden totalmente a la realidad, debido a que no son considerados los cambios de volumen de tráfico, accidentes, el clima etc.

Otros factores que se consideran como costos de estos sistemas tiene que ver con:

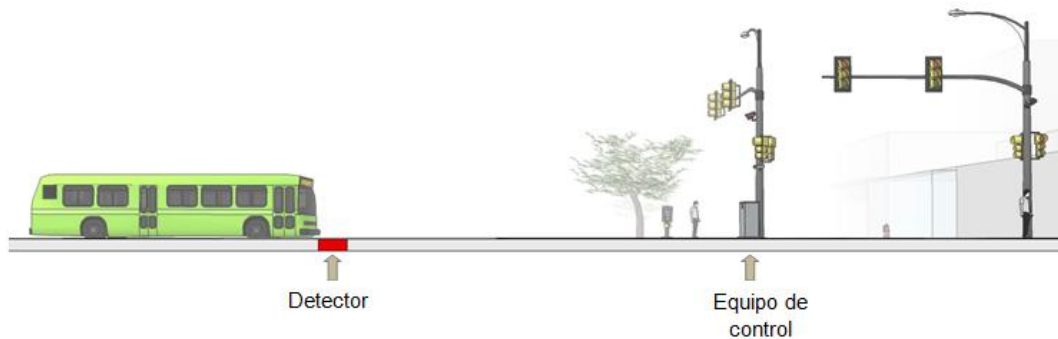
- Diseño y la funcionalidad deseada para el sistema de priorización

¹⁹ *An Overview of Transit Signal Priority Advanced*, Traffic Management Systems Committee et al, 2002

- Tipo de vías y equipamientos
- Actualización de la tecnología
- Operación y mantenimiento de equipos
- Capacitación de personal para la programación y uso del sistema
- Tiempo necesario para establecer integración con las diferentes entidades y aceptación del sistema.

Basado en una limitada cantidad de datos reportados, los costos se precisan entre U\$ 8.000 y U\$ 35.000 por intersección. Este costo varía ampliamente debido a la diferencia en el diseño del sistema y su funcionalidad; y las especificaciones incluidas en los costos. Es posible que los costos de otros sistemas existentes se queden fuera de este rango de costos²⁰.

Figura 14.Esquema básico de Sistema de Priorización



Fuente: Elaboración propia, basada en el *Transit Signal Priority Handbook*, 2005.

²⁰ *An Overview of Transit Signal Priority Advanced*, Traffic Management Systems Committee et al, 2002

5.5 Parámetros considerados en la implementación de sistemas de priorización de tráfico.

Existen muchos factores que afectan la implementación de sistemas de priorización de tráfico, entre ellos:

La geometría de la vía, es uno de los factores más importantes de cualquier sistema de transporte, este establece directamente la capacidad y el tipo de operación posible. Este parámetro usualmente es el que limita la implementación de este sistema.

Aunque el **volumen de tráfico** varía constantemente en un punto específico, la hora pico parece ser el intervalo de tiempo más importante para evaluar el sistema de priorización de tráfico, debido a que en ese momento todas las intersecciones o la mayoría están en condiciones de operación críticas.

El software de las señales de tráfico (semáforos) determina cómo operará el sistema de priorización. Para cualquier proyecto el paso inicial es evaluar los controladores existentes, para establecer si es compatible con el sistema de priorización, y, si este controlador se adecua a las necesidades que el diseño requiere.

Los peatones tienen gran influencia en la operación del sistema de priorización en una intersección semaforizada. En muchos casos, el tiempo requerido para que un peatón atraviese la intersección de forma segura limita el tiempo disponible para la priorización, por lo cual, es necesario realizar un estudio minucioso de tiempos en cada una de las intersecciones.

Igualmente, se considera la operación de las **intersecciones adyacentes**; las practicas y políticas de las **entidades encargadas**; el tipo de **sistema de transito** y la localización de **las paradas**, etc.

5.5.1 Interacción entre agencias del transporte público y particular

Los sistemas de prioridad semafórica solamente pueden ser implementados a través de una solida asociación de las agencias de transito público y las de control de tráfico vehicular. Esto requiere un dialogo continuo y una asociación de trabajo solida. Desafortunadamente, es más común observar una total falta de comunicación entre el personal de las agencias reguladoras, por varias razones: Entre ellas, debido a que sus estructuras institucionales son divergentes con la operación y el control; autoridades independientes, desde el orden local, regional y nacional.

Además, el enfoque es a veces diferente (vehículos contra desplazamiento de peatones) como lo son sus objetivos. No obstante, con algunas implementaciones exitosas de Sistemas de Prioridad se ha llegado a una conclusión, que a mayor movimiento de personas, se reduce los vehículos y por lo tanto se benefician ambos, transporte público y particular.

Por otra parte, y a pesar de que estos sistemas de priorización no han sido ampliamente aplicados y muchos menos estudiados, se tienen ciertos casos en los que se pueden establecer indicadores de uso. Sin embargo, hay que tener en cuenta que cada ejemplo de aplicación ha presentado diferentes problemas y condiciones que dependen del país, de la configuración de la ciudad y del sistema de gestión de tráfico. Igualmente, las soluciones que se han dado son para ajustarlas a las condiciones del trafico presentes en esos casos.

La siguiente tabla tomada de una tesis de especialización en transportes, presenta los ahorros de tiempo que se obtuvieron con la implementación de sistemas de prioridad semafórica. Allí se especifica que estrategia se utilizó y que porcentaje de tiempo se ahorró el sistema vial.

Figura 15. Experiencias internacionales con la implantación de sistemas de prioridad semafórica

Ciudad	Método Utilizado		
	Pasivo	Activo	Tiempo Real
Chicago	15%		
Portland	10%		
Los Ángeles		G.E ⁽¹⁾ , E.G ⁽²⁾ 25%	
Seattle		G.E., E.G. 13%	
Toronto			SCOOT 37%
Twickenham			SCOOT
Eastleigh			SCOOT 9seg
Eindhoven		G.E., E.G. 17 seg	
Sapporo		6 %	

(1) G.E. green extension
(2) E.G. early green

Fuente: CAÑELLES, David S., Análisis operativo y medioambiental de los sistemas de prioridad semafórica, 2009.

Igualmente, en dicha tesis menciona que una de las causas por las cuales estos sistemas no son utilizados por las agencias encargadas de la gestión de tráfico, se basan en la dificultad de crear planes de coordinación con intersecciones adyacentes a dicho sistema; además, de los costos de implementación y mantenimiento que estos sistemas representa.