

**DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA
INTERSECCIÓN TIPO DIAMANTE EN CIUDADES COLOMBIANAS**

YERLY FABIAN MARTINEZ ESTUPIÑAN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012

**DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA
INTERSECCIÓN TIPO DIAMANTE EN CIUDADES COLOMBIANAS**

YERLY FABIAN MARTINEZ ESTUPIÑAN

Trabajo de Grado para optar al
Título de Magister en Ingeniería Civil

DIRECTOR
HERNAN PORRAS DÍAZ
Profesor Titular de la Universidad Industrial de Santander

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012

*A Dios gestor de todo lo que somos
A mi madre, por su inagotable amor, por enseñarme que aunque el viaje parezca largo,
siempre se debe hacer lo posible por llegar, a mi padre y mis hermanos por su apoyo y
confianza silenciosa, a mis verdaderos amigos, aquellos que siempre han tenido una palabra
con la cual hacer brotar una sonrisa del alma*

AGRADECIMIENTOS

Han pasado tantas cosas desde el momento en que arranco toda esta aventura llamada maestría en ingeniería civil, tantos momentos vividos, algunos buenos, otros no tanto, tantas personas, que sería injusto de mi parte no reconocerles su apoyo, sus palabras y sus sonrisas en cada uno de los momentos compartidos.

Agradezco primero a mi director de proyecto, el profesor Hernán Porras Díaz, por la oportunidad brindada al dejarme pertenecer al grupo de investigación GEOMATICA, por su orientación y colaboración, y sobre todo por enseñarme a su modo que cuando algo parece imposible, es porque lo estamos mirando por el lado que no es.

A la Escuela de Ingeniería Civil por la oportunidad brindada, a los profesores por todo este tiempo de enseñanza y formación. A cada uno de los integrantes del grupo GEOMATICA, a todos aquellos que de alguna forma me acompañaron durante todo este proceso, las experiencias vividas, el conocimiento adquirido, el mundo conocido con ayuda del grupo son imborrables. A los ingenieros Sandy Yanes y Vanessa Quiroga por su orientación laboral y por su exigencia, a aquellos muchachos que han sido mis compañeros de trabajo (Miguel, Andrés, Laura, Edwin, Vanessa, Gonzalo y Sebas) pero que para mí siempre han sido mis amigos, gracias por su colaboración y paciencia.

A aquellas personas que considero mis amigos verdaderos, a Tata por enseñarme que la amistad es algo más que te llamen todo los días, es estar ahí cuando tú no lo esperas y que con una sonrisa te muestren que vale la pena seguir adelante, a José Miguel por enseñarme un grado de responsabilidad y compromiso con el que muy pocos cuentan, por su ayuda en todo este tiempo, no solo en el posgrado, también en el pregrado y por su amistad sincera. A Anny mi economista favorita, a Raúl Mora otro nombre que indica compromiso y amistad, a mi amigo Manuel por

su apoyo incondicional desde el colegio, aquel con el que comparto las penas y alegrías de nuestro querido Bucaramanguita.

A mis niñas de la “Happy hour” Ferchis, Leidy y Andreita, gracias por su amistad sincera, gracias por hacerme reír tanto, gracias por sus terapias de mejoramiento de personalidad. Ferchis no hay palabras para describir el aprecio que siento por ti, gracias por tu amistad, gracias por tus regaños, gracias por tus consejos, gracias por estar ahí.

A mi querida amiga Xiomara, tus locuras y forma de ser siempre llenan de alegría cada momento y a todos aquellos que de una forma fueron testigos de todo este proceso.

Y el principal de todos a Dios, por su guía, por la oportunidad brindada, por la maravillosa familia que tengo, por los que a diario vale la pena seguir luchando.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	19
1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.1. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	21
2. SITUACIÓN DE LA MOVILIDAD URBANA EN LAS CIUDADES COLOMBIANAS	23
2.1. CARACTERISITCAS DE LA MOVILIDAD URBANA EN COLOMBIA	24
2.1.1. La población en las ciudades colombianas.....	26
2.1.2. Situación de la demanda.	30
2.1.3. Situación de la oferta.....	33
2.2. LA BUSQUEDA DE UNA MOVILIDAD ADECUADA EN LAS CIUDADES COLOMBIANAS.....	36
2.2.1. Medidas de gestión de la oferta y la demanda.....	37
3. CARACTERIZACIÓN DE INTERSECCIONES VIALES	43
3.1. ASPECTOS GENERALES	43
3.1.1. Niveles de control en intersecciones.....	45
3.1.2. Intersecciones semaforizadas	48
3.1.3. Coordinación de semáforos.....	51
3.2. INTERSECCIONES VIALES	53
3.3. INTERSECCIONES DIAMANTE.....	61
3.3.1. Contexto histórico.....	61
3.3.2. Consideraciones de diseño geométrico	68
3.3.3. Operación y funcionamiento	73
3.3.4. Controladores en intersecciones diamante.....	82
3.3.5. Señalización	92
3.3.6. Intersecciones tipo divergente diamante.....	97
3.3.7. Variaciones de las intersecciones.....	101
3.3.8. Beneficios e inconvenientes	108
4. MODELOS DE OPERACIÓN DE INTERSECCIONES DIAMANTE	111
4.1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN INTERSECCIONES DIAMANTE.....	111
4.2. FUNDAMENTOS DE MODELOS DE OPERACIÓN	114
4.2.1. IDIRMS (Sistema integrado de intercambiador diamante y rampa).....	114

4.2.2.	Algoritmo del tráfico local de respuesta	125
4.2.3.	Modelo del valor umbral	128
4.2.4.	El modelo de las dos capacidades en la operación de intersecciones divergente diamantes.	133
4.2.5.	DRIVE (Diamond interchange and ramp metering via evaluation)	136
4.2.6.	ICS (Modelo de la estrategia de control integrado)	141
4.2.7.	ALINEA	146
4.3.	MODELOS DE MICROSIMULACIÓN	149
4.3.1.	Estrategias de tiempo fijo	151
4.3.2.	Estrategias de control sensible al tráfico.....	152
5.	CASO DE ESTUDIO CIUDAD DE BUCARAMANGA	155
5.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MOVILIDAD DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA 155	
5.1.1.	Población.....	155
5.1.2.	Tasas de motorización.....	158
5.1.3.	Tendencias de los viajes	163
5.2.	SELECCIÓN DE LA INTERSECCIÓN OBJETO DE ESTUDIO	167
5.2.1.	Selección de la intersección	168
5.3.	SELECCIÓN DEL MODELO OPERACIONAL A USAR	190
5.4.	PROCESO DE MICROSIMULACIÓN.....	194
5.4.1.	Escenarios de microsimulación	197
5.4.2.	Información de entrada.....	204
5.4.3.	Calibración del modelo inicial	210
5.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	221
5.5.1.	Resultados a nivel de demanda.....	222
5.5.2.	Matriz multicriterio	230
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	246
6.1.	FUTURAS INVESTIGACIONES	250
	REFERENCIAS	252

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación PIBpc - motorización	25
Figura 2. Proyecciones de población para ciudades región	27
Figura 3. Proyección de tasas de motorización en Colombia	32
Figura 4. Conflictos en una intersección	44
Figura 5. Intersecciones en T	54
Figura 6. Intersecciones en Y	55
Figura 7. Intersecciones en cruz	56
Figura 8. Glorieta o rotonda	57
Figura 9. Minirotonda	58
Figura 10. Intersección tipo trébol parcial	59
Figura 11. Trébol completo	59
Figura 12. Intersecciones rotatorias	60
Figura 13. Intersección tipo diamante	62
Figura 14. Intersección tipo diverging diamond interchange	62
Figura 15. Diagrama de una intersección tipo Jughandle	63
Figura 16. Intersección I-95 con I-695 Baltimore	64
Figura 17. Intersección I-44 Springfield Missouri	66
Figura 18. Synchronized Split – Phasing (SSP)	69
Figura 19. Esquema de operación DDI	70
Figura 20. Diagrama de volúmenes entrantes	71
Figura 21. Entradas externas	73
Figura 22. Esquema de operación de cuatro fases	77
Figura 23. Esquema de operación de tres fases	79
Figura 24. Esquema de operación Lead - Lag	81
Figura 25. Intersección diamante – Estructura de controladores separados	82
Figura 26. Estructura de controladores en anillos	83
Figura 27. Overlaps en el sistema de tres fases	85

Figura 28. Secuencia sistema de tres fases.....	85
Figura 29. Secuencia de control sistema de cuatro fases	87
Figura 30. Bahías de carga.....	89
Figura 31. Indicaciones para peatones	90
Figura 32. Localización de detectores.....	91
Figura 33. Señalización de mástil horizontal	92
Figura 34. Señalización de mástil horizontal de 5 secciones	93
Figura 35. Mástil de señalización horizontal intersección diamante	93
Figura 36. Movimientos de peatones en intersecciones diamante	94
Figura 37. Codificación fases semafóricas en intersecciones diamante.....	95
Figura 38. Intersección tipo divergente diamante, Versailles - Francia.....	97
Figura 39. Puntos de conflicto intersección diamante convencional.....	98
Figura 40. Puntos de conflicto en una intersección divergente diamante	99
Figura 41. Movimientos posibles dentro de la intersección	100
Figura 42. Sistema de operación de dos fases	101
Figura 43. Simulación intersección diamante divergente realizada por la FWHA.....	107
Figura 44. Simulación intersección diamante convencional realizada por la FWHA.....	108
Figura 45. Condiciones del flujo interrumpido en la circulación de un carril de un acceso a una intersección semaforizada	114
Figura 46. Esquema de sistema de una intersección diamante con rampas de llegada.	115
Figura 47. Diseño de fases estándar intersección diamante	116
Figura 48. Convenciones para IDIRMS.....	124
Figura 49. Método de la llegada y partida acumulada	131
Figura 50. Diagrama flujo - ocupación	134
Figura 51. Diagrama de la relación flujo – velocidad para una serie de tiempo.....	134
Figura 52. Modelo DRIVE	138
Figura 53. Ejemplo de resultados gráficos arrojado por DRIVE	141
Figura 54. Incidente dentro del intercambiador	144
Figura 55. Incidente fuera del intercambiador	145
Figura 56. Área metropolitana de Bucaramanga.....	156

Figura 57. Distribución y crecimiento de la población urbana de Santander y el área metropolitana.....	157
Figura 58. Nivel de motorización de automóviles para el área metropolitana y el departamento de Santander 1990 - 2009	159
Figura 59. Tasa de motorización vehículos 1990 - 2009.....	161
Figura 60. Nivel de motorización de motocicletas para el área metropolitana y el departamento de Santander 1990 - 2009	162
Figura 61. Tasa de crecimiento de la malla vial VS crecimiento del parque automotor ..	164
Figura 62. Distribución de viajes por municipios del área metropolitana	165
Figura 63. Distribución de viajes por modo municipios del área metropolitana de Bucaramanga	166
Figura 64. Estaciones de aforos vehiculares.....	170
Figura 65. Intersecciones semaforizadas.....	173
Figura 66. Intersecciones controladas por el mismo equipo.....	182
Figura 67. Intersecciones con dos carriles y bajos volúmenes de vehículos pesados....	184
Figura 68. Intersecciones que cumplen la condición de estacionamientos.....	185
Figura 69. Intersecciones seleccionadas	186
Figura 70. Ubicación de intersecciones semaforizadas sobre el eje vial de la calle 56 ..	187
Figura 71. Sección transversal característica eje vial de la calle 56	188
Figura 72. Zona de influencia de la solución planteada	198
Figura 73. Red de modelación escenario 1	199
Figura 74. Red de modelación escenario 2 y 3	200
Figura 75. Diseño intersección carrera 28 con calle 56.....	201
Figura 76. Diseño intersección carrera 22 con calle 56.....	201
Figura 77. Glorieta a desnivel	202
Figura 78. Red de modelación glorieta a desnivel.....	203
Figura 79. Esquema tercer carril para giro izquierdo, escenario 5	204
Figura 80. Distribución vehicular horaria carrera 27 con calle 56	205
Figura 81. Flujos vehiculares zona de influencia.....	205
Figura 82. Fases semafóricas existentes eje vial calle 56.....	207
Figura 83. Numeración de fases escenario 2.....	208

Figura 84. Numeración de fases escenario 3.....	209
Figura 85. Herramienta en TransModeler para el manejo de la operación semafórica...	210
Figura 86. Análisis de sensibilidad parámetro paso de simulación.....	217
Figura 87. Análisis de sensibilidad parámetro tiempo de reacción en reposo	218
Figura 88. Análisis de sensibilidad parámetro de velocidad deseada.....	218
Figura 89. Análisis de sensibilidad parámetro máxima aceleración	219

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proyección de población para ciudades región.....	27
Tabla 2. Proyecciones de población para ciudades intermedias	28
Tabla 3. Composición de las ciudades región	28
Tabla 4. Proyección de la motorización en Colombia	31
Tabla 5. Evolución de la distribución modal en ciudades colombianas.....	32
Tabla 6. Parámetros de semaforización para la condición A	49
Tabla 7. Parámetros de semaforización para la condición B	49
Tabla 8. Agencias Norteamericanas que han considerado este diseño	67
Tabla 9. Condiciones para la ubicación de detectores.....	92
Tabla 10. Tiempos fases semaforicas intersección diamante.....	95
Tabla 11. Comparación de puntos de conflicto entre una intersección diamante convencional y una divergente.....	98
Tabla 12. Variaciones intersecciones diamante.....	103
Tabla 13. Criterios de evaluación para una intersección tipo DI y DDI	106
Tabla 14. Comparación del funcionamiento intersección tipo DI y DDI	108
Tabla 15. Cálculo de demanda en movimientos de tráfico	124
Tabla 16. Umbrales para sistemas de DI en Estados Unidos.....	129
Tabla 17. Parámetros de entrada y salida modelo DRIVE.....	136
Tabla 18. Proyecciones población área metropolitana de Bucaramanga	155
Tabla 19. Tasas de crecimiento poblacional.....	158
Tabla 20. Nivel de motorización automóviles.....	159
Tabla 21. Nivel de motorización motocicletas	162
Tabla 22. Categorías de estaciones de conteo.....	169
Tabla 23. Resultados de toma de velocidades	171
Tabla 24. Ubicación de intersecciones con semáforo	173

Tabla 25. Caracterización de los equipos de semáforos actuales	179
Tabla 26. Intersecciones con más de dos fases semaforicas	182
Tabla 27. Intersecciones preseleccionadas	185
Tabla 28. Parámetros empleado por cada modelo	191
Tabla 29. Parámetros de comportamiento vehicular.....	193
Tabla 30. Requerimientos mínimos de datos de entrada.....	196
Tabla 31. Composición vehicular por acceso	206
Tabla 32. Tiempo semaforico escenario 2	208
Tabla 33. Fases semaforicas escenario 3	209
Tabla 34. Criterios de calibración de modelos	213
Tabla 35. Estadístico GEH de calibración de primer nivel	215
Tabla 36. Valores de parámetros generales TransModeler	216
Tabla 37. Valores de parámetros por defecto TransModeler, vehículos livianos	216
Tabla 38. Valores de parámetros por defecto TransModeler, buses	216
Tabla 39. Resumen análisis de sensibilidad	220
Tabla 40. Valores de parámetros generales calibrados.....	220
Tabla 41. Valores de parámetros calibrados autos livianos.....	221
Tabla 42. Valores de parámetros calibrados buses	221
Tabla 43. Resultados de velocidad y NDS por escenario	223
Tabla 44. Tiempos de viaje escenario 1	227
Tabla 45. Tiempos de viaje escenario 2	227
Tabla 46. Tiempos de viaje escenario 3	228
Tabla 47. Tiempos de viaje escenario 4 y 5.....	228
Tabla 48. Resultados operacionales de demoras escenarios 1, 2.1 y 2.2	229
Tabla 49. Resultados operacionales de demoras escenarios 3.1, 3.2, 4 y 5	229
Tabla 50. Variables a tener en cuenta	232
Tabla 51. Clasificación establecida para los niveles de servicio en intersecciones	234

Tabla 52. Clasificación establecida para la resolución de movimientos vehiculares	235
Tabla 53. Clasificación establecida para la integración modal en intersecciones	236
Tabla 54. Aumento de la velocidad media de la red	237
Tabla 55. Valoración de las interferencias con redes de servicios públicos ...	240
Tabla 56. Matriz multicriterio para vías e intersecciones	241
Tabla 57. Matriz multicriterio diligenciada para cada escenario.....	243
Tabla 58. Inversión estimada	244

RESUMEN

TÍTULO: Determinación de la viabilidad en la implementación de una intersección tipo diamante en ciudades colombianas.*

AUTOR: Yerly Fabián Martínez Estupiñan**

PALABRAS CLAVES: Diamante, Fases, Intersección, Parámetros.

DESCRIPCIÓN

Las intersecciones tipo diamante divergente son un tipo especial de alternativa de diseño muy reciente en el mundo para la solución de conflictos viales, su funcionamiento básicamente consiste en un cambio regulado semafóricamente de los sentidos de flujo y hasta el momento su implementación en países de Latinoamérica es nulo, lo que supone un desaprovechamiento de sus beneficios. En este trabajo se ha realizado un proceso de recopilación de la información acerca del diseño, uso y operación de este tipo de intersecciones en el mundo, se han analizado los modelos existentes relacionados con la operación vehicular y semafórica para su control. Todo este proceso se ha aplicado al análisis de un caso específico en la ciudad de Bucaramanga donde la demanda vehicular como en otras ciudades colombianas está superando la oferta ofrecida por la infraestructura vial existente, mediante el uso de 6 diferentes escenarios de simulación que permitieron comparar y medir el grado de impacto de cada uno de los parámetros escogidos.

Los modelos de operación seleccionados fueron los modelos IDIRMS y DRIVE los cuales basan su funcionamiento en los flujos de saturación, las intersecciones escogidas para realizar el intercambio fueron la intersección de la carrera 28 con calle 56 y la carrera 22 con calle 56.

Los resultados obtenidos en las simulaciones dejan ver la efectividad operacional de la intersección tipo diamante y diamante divergente, contrastando con los resultados obtenidos para los otros escenarios, además los costos de inversión resultan menores en comparación con la opción del paso a desnivel, pero son más altos que la opción del tercer carril, se observa un mejoramiento de las velocidades en corredores como el de la carrera 27 y el de la calle 56, calle 55, carrera 22 y carrera 21, mostrándose como una buena alternativa de diseño para las ciudades colombianas.

* *Proyecto de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil*

** *Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hernán Porras Díaz*

ABSTRACT

TÍTULO: Determination of viability in the implementation of diamond intersection in Colombian cities.*

AUTHOR: Yerly Fabián Martínez Estupiñan**

KEYWORDS: *Diamond, Phases, Intersection, Parameters.*

DESCRIPTION

Diverging diamond intersections are a recently developed alternative to solve traffic conflicts, where the traffic flow directions are changed by regulating traffic lights. So far, its implementation in Latin American countries is null, wasting all the benefits provided by this control alternative. Compiled information about design, implementation and operation of diverging diamond intersections around the world is presented. Subsequently, existing control models related to vehicular and traffic lights operation were analyzed. The whole process was applied to the specific case of Bucaramanga city, where vehicular demand is outpacing vial infrastructure supply. Analysis was developed by utilizing six simulation scenarios, comparing and measuring the impact degree of each chosen parameter.

The operating models selected were IDIRMS model and DRIVE model, which base their operation in saturation flows; intersections chosen for the exchange were the intersection of carrera 28 with calle 56 and carrera 22 and calle 56.

The results obtained in the simulations reveal the operational effectiveness of the intersection, diamond and diamond divergent, contrasting with the results obtained for the other scenarios, plus the investment costs are lower compared with the overpass option, but are more higher than the third rail option, there is an improvement of the velocities in corridors such as carrera 27 and calle 56, calle 55, carrera 22 and carrera 21, shown as a good alternative design for the Colombian cities

* Graduation project to qualify the title of Master of Civil Engineering

** Faculty of Physical Mechanical. School of Civil Engineering: Director: Hernán Porras Díaz

INTRODUCCIÓN

Las exigencias del mundo actual y el acelerado desarrollo de la ciencia y la tecnología, obligan a las ciudades a reestructurar constantemente las metodologías de operación de los sistemas viales, adaptándolos a las condiciones del medio, siendo éste un campo de interés que ha presentado un gran desarrollo con la ayuda de las computadoras y su aplicación en la ingeniería.

Un elemento fundamental para la movilización en las grandes ciudades es la calle, los sistemas de calles ofrecen servicios de transporte, como factor prioritario para la comunicación dentro de las mismas. Lo anterior genera una gran dependencia del desarrollo de las ciudades a la capacidad de operación de los sistemas viales para satisfacer los incrementos de demanda de los usuarios por los servicios ofrecidos por dichas redes; con lo que una deficiencia en la operación de estos sistemas viales origina problemas de tránsito, que hacen necesario buscar soluciones viales adecuadas a las características del flujo del tránsito, que busquen la comodidad de los usuarios, reducción en el número de accidentes, prevención del congestionamiento de y obtención de un tránsito eficiente y seguro.

Pero uno de los factores que más retrasa las acciones para hacerle frente al crecimiento de la demanda en muchas ciudades intermedias de Latinoamérica es la falta de inversión en nueva infraestructura, ya sea porque el dinero destinado no es suficiente o por otros motivos, además porque muchas de las soluciones planteadas siempre se enmarcan en grandes intercambiadores u obras de infraestructura que implican una gran afectación predial y un gran costo.

Es por todo esto que al hacer un análisis desde la perspectiva de la infraestructura vial se hace necesario contar con alternativas de solución que permitan mejorar o disminuir problemas puntuales de intersecciones que son el punto de partida para el problema de caos vehicular, esta investigación busca analizar un caso particular

de intersección conocida con el nombre de Intersección tipo Diamante, que ha sido implementada en países de Europa y en Ciudades Norteamericanas, pero que a nivel Latinoamericano no se tiene ningún tipo de antecedente.

Además se busca establecer cuáles son los parámetros que más inciden en su funcionamiento aplicado a un caso particular de una ciudad colombiana como lo es Bucaramanga, estableciendo unos entornos de simulación que permitan ver la incidencia de los parámetros y por último emitir un concepto que sirva de punto de partida para la implementación de este tipo de soluciones como alternativa nueva pero eficaz, esto dependiendo de los resultados.

1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación busca evaluar la viabilidad de implementar una intersección tipo diamante ajustada a las condiciones de oferta y demanda de las vías de nuestro país, por lo tanto el objetivo principal planteado deberá responder la siguiente pregunta ¿Es viable implementar una solución de una intersección tipo diamante en el entorno vial de nuestro país?

Para responder a la pregunta general de investigación, se han formulado los siguientes objetivos específicos:

- Determinar los parámetros y variables que intervienen significativamente en el funcionamiento de una intersección tipo diamante.
- Seleccionar un modelo que permita medir el rendimiento de las intersecciones tipo diamante basados en las características del entorno de nuestro país.
- Determinar la efectividad del modelo mediante la aplicación a un caso de estudio particular de la ciudad de Bucaramanga.

Es importante aclarar que la investigación se centrará en analizar los modelos existentes para la operación de este tipo de intersecciones y su respectivo impacto al aplicarlo a un caso de estudio de la ciudad de Bucaramanga.

1.1. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis de investigación está dividida en 6 capítulos así:

En el *Capítulo 1, Introducción*, se define el ámbito del estudio, se presenta el objetivo principal y los objetivos específicos, y se presenta la forma en que se ha estructurado el documento.

En el *Capítulo 2, Situación de la movilidad urbana en las ciudades colombianas*, se hace una descripción de las condiciones de movilidad de las ciudades en Colombia.

En el *Capítulo 3, Caracterización de intersecciones viales*, se hace la caracterización del funcionamiento de las intersecciones en general, para después profundizar acerca de las intersecciones tipo diamante, aspectos como su uso, operación, diseño geométrico y todas las características que permitan entender su funcionamiento

En el *Capítulo 4, Modelos de operación de intersecciones diamante*, se realiza la presentación de los diferentes modelos existentes para la operación vehicular en este tipo de intersecciones, se muestran las metodologías que usa, los parámetros y los resultados que arroja cada modelo. Además se hace un análisis de los modelos de microsimulación y el proceso de calibración para dichos modelos.

En el *Capítulo 5, Caso de estudio ciudad de Bucaramanga*, en este capítulo se presentan los escenarios de simulación planteados, así como los modelos de operación seleccionados, se hace el análisis de resultados.

En el *Capítulo 6, Conclusiones y futuras investigaciones*, se ilustran las principales conclusiones, así como las nuevas líneas de investigación que se generan a partir de la creación de este documento.

2. SITUACIÓN DE LA MOVILIDAD URBANA EN LAS CIUDADES COLOMBIANAS

En la actualidad, el transporte de personas y mercancías en las ciudades es un problema que conlleva congestión, contaminación atmosférica, consumo de energía, ruido, pérdida de tiempo, accidentes, etc. Esta crisis se deriva de la existencia de numerosos conflictos de difícil solución como son: alta demanda de energía, emisión de gases efecto invernadero, enfermedades causadas por la baja calidad del aire, deterioro de la salud debido al ruido y al sedentarismo, mortalidad y morbilidad, ocupación creciente del espacio urbano, pérdida de autonomía en los desplazamientos de grupos sociales vulnerables, disminución del carácter socializador y comunicador del espacio público, tiempo dilapidado en los atascos y enorme esfuerzo económico.

A estos conflictos se une la dificultad, por parte de las autoridades de transporte, para gestionar la movilidad. Esto es debido principalmente al modelo urbano disperso actual, que dificulta una oferta de calidad del transporte público. No existe una integración adecuada del transporte en la planificación de nuevos desarrollos de viviendas, zonas comerciales y oficinas, a lo que se unen dificultades para la financiación de los servicios de transporte de calidad que la sociedad demanda. En ocasiones, existe una falta de coordinación entre las autoridades gestoras del transporte y responsables de las infraestructuras. Además, la prioridad al transporte público y su accesibilidad no siempre están presentes a la hora de gestionar el sistema de rutas urbano y no se persiguen eficazmente conductas infractoras del vehículo privado.

El Libro Verde “Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana”, aprobado por la Comisión Europea en septiembre de 2007, destaca el papel de las ciudades como motor de la economía, atrayendo cada vez en mayor medida la inversión y el empleo, siendo indispensables para el correcto funcionamiento de la economía mundial [1], es por ello que la movilidad urbana, considerada como elemento

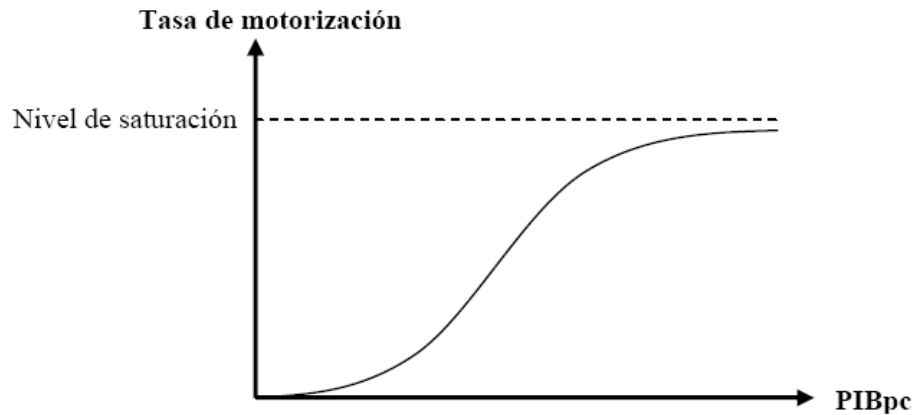
impulsor del crecimiento y del empleo y con un gran impacto en el desarrollo sostenible de las ciudades, debe facilitar el desarrollo económico de las mismas, la calidad de vida de sus habitantes y la protección del medio ambiente y no convertirse en un obstáculo adicional para su desarrollo.

2.1. CARACTERISITCAS DE LA MOVILIDAD URBANA EN COLOMBIA

En los últimos años de la mano del crecimiento económico, las ciudades colombianas han experimentado un aumento acelerado en su población de nuevos automóviles. Esto ha venido acompañado por un crecimiento muy fuerte del número de motos en el país. Sin embargo, de acuerdo con la experiencia mundial de países de ingreso medio, pareciera que este fenómeno apenas ahora comienza en Colombia, y que la tasa de motorización (vehículos por habitante) seguirá creciendo de manera muy fuerte en las próximas décadas. Actualmente la motorización en Colombia es baja en comparación con países de desarrollo similar, menos de 7 carros y 5 motos por cada cien habitantes [2].

Se ha encontrado que el nivel de ingreso de la población, generalmente expresado por el producto interno bruto per cápita, o PIBpc, es el principal determinante de la tasa de motorización de un país [3]. Además, se ha demostrado que la relación entre motorización e ingreso está representada por una curva en forma de S. esta forma implica que la mayor parte del crecimiento de la tasa de motorización se da en cierto rango de crecimiento del PIBpc.

Figura 1. Relación PIBpc - motorización



Fuente: Libro Blanco, 2008

Intentar estimar este tipo de curva para Colombia con base en datos históricos sería poco confiable, ya que estos datos están concentrados en la parte baja de la curva, y si a eso le añadimos el caso particular de nuestro país por el fenómeno de desplazamiento de población que llega a las ciudades, como consecuencia del conflicto armado que se ha venido desarrollando desde hace más de 40 años [4], encontrándose que los efectos del desplazamiento forzado han generado la movilidad de 2'500.000 colombianos de los campos a las ciudades en los últimos 15 años, según cifras de CODHES [5].

Lo anterior ha generado otro fenómeno común en nuestra actual sociedad, en donde la mayor proporción de la población es pobre, teniendo que en las ciudades es posible observar diferentes tipos de pobladores, los formales, los de bajos recursos sin oportunidad de empleo y un nuevo conjunto de pobladores conformado por grandes grupos de personas en la informalidad laboral. Toda esta población que le aporta al PIBpc una cuantía significativa, vive en y del espacio público y consume una importante parte de su tiempo en desplazamientos, pocas veces predecibles o recurrentes, pero su movilidad debe ser considerada en su medida, como un problema de justicia social y oportunidades [6].

2.1.1. La población en las ciudades colombianas.

La dinámica de crecimiento urbano es uno de los principales factores que ha caracterizado a los países en vía de desarrollo durante el siglo XX y comienzos del presente, con indudables repercusiones sobre la eficacia del transporte urbano. Actualmente, América Latina alberga algunas de las grandes metrópolis del mundo, ciudades que superan los 15 millones de habitantes.

Se tiene que el fenómeno del crecimiento demográfico ha sido de relevante importancia en Colombia y que indudablemente se ha presentado por tres factores fundamentales: un alta tasa de crecimiento demográfico, fenómeno migratorio del campo hacia las ciudades capitales de departamento y el fenómeno de metropolización que actualmente se presenta en algunos territorios.

Se tiene que en las diferentes ciudades se establecen y surgen barrios periféricos, debido al desarrollo no planificado de las ciudades (causado en gran medida por fenómeno migratorio), lo cual conlleva a la improvisada construcción de viviendas, generación de nuevas centralidades y expansión caótica de la ciudad, vislumbrándose entonces unas nuevas necesidades de comunicación que aumentan la exigencia en infraestructura y oferta de transporte.

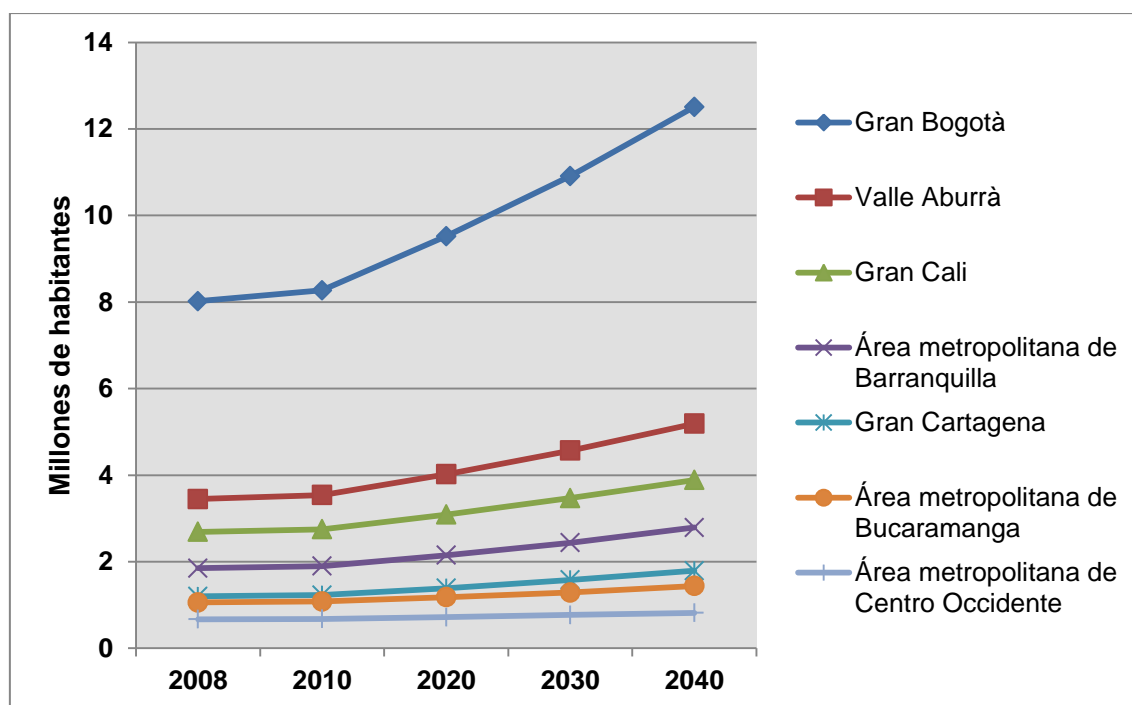
En el caso de las tasas de crecimiento de la población de las principales ciudades del país han oscilado en las últimas décadas en torno del 2% anual. De acuerdo con las proyecciones del DANE, se espera que estas disminuyan paulatinamente. En las tablas 1 y 2 se muestran las proyecciones de población para algunas de las ciudades grandes e intermedias. Las proyecciones hasta el 2020 están basadas en datos DANE; de 2020 a 2040 se supone una tasa de crecimiento anual constantes, basado en información tomada del Libro Blanco 2008 de la Universidad de Los Andes.

Tabla 1. Proyección de población para ciudades región

Proyecciones demográficas para las ciudades región (millones de habitantes)						
	2008	2010	2020	2030	2040	Tasa de crecimiento anual 2020-2040
	Gran Bogotá	8,02	8,27	9,52	10,91	12,51
Valle de Aburrá	3,45	3,54	4,02	4,57	5,19	1,28%
Gran Cali	2,69	2,75	3,09	3,47	3,89	1,17%
Área metropolitana de Barranquilla	1,85	1,9	2,15	2,44	2,79	1,32%
Gran Cartagena	1,2	1,23	1,39	1,58	1,79	1,26%
Área metropolitana de Bucaramanga	1,06	1,08	1,18	1,29	1,44	1,00%
Área metropolitana de Centro Occidente	0,67	0,68	0,72	0,77	0,82	0,65%

Fuente: Proyecciones de población del DANE hasta 2020, Libro Blanco 2008

Figura 2. Proyecciones de población para ciudades región



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tabla 1

Tabla 2.Proyecciones de población para ciudades intermedias

Proyecciones demográficas para las ciudades intermedias (millones de habitantes)						
	2008	2010	2020	2030	2040	Tasa de crecimiento anual
						2020-2040
Armenia	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,57%
Cúcuta	0,61	0,62	0,68	0,76	0,84	1,01%
Ibagué	0,52	0,53	0,58	0,64	0,71	0,99%
Manizales	0,38	0,40	0,41	0,42	0,44	0,44%
Montería	0,40	0,41	0,48	0,55	0,64	1,50%
Neiva	0,32	0,33	0,35	0,38	0,40	0,65%
Pasto	0,40	0,41	0,47	0,54	0,62	1,40%
Popayán	0,26	0,27	0,29	0,32	0,34	0,83%
Santa Marta	0,44	0,45	0,53	0,62	0,74	1,67%
Sincelejo	0,25	0,26	0,30	0,34	0,40	1,49%
Tunja	0,16	0,17	0,21	0,25	0,30	1,81%
Valledupar	0,38	0,40	0,51	0,63	0,79	2,25%
Villavicencio	0,41	0,43	0,54	0,68	0,85	2,25%

Fuente: Proyecciones de población del DANE hasta 2020, Libro Blanco 2008

La población de las ciudades grandes que se presentan en las tablas anteriores incluye la población de los municipios circunvecinos, conformando lo que se denomina la gran ciudad, esos grupos de municipio son los siguientes:

Tabla 3.Composición de las ciudades región

Municipios que conforman las ciudades-Región	
Gran ciudad	Municipios
Gran Bogotá	Bogotá D.C, Cajicá, Chía, Cota, Funza, La Calera, Madrid, Mosquera, Sibaté y Soacha
Área Metropolitana del Valle de Aburrá	Medellín, Barbosa, Bello, Caldas, Copacabana, Envigado, Girardota, Itagüí, La Estrella y Sabaneta
Gran Cali	Cali, Jamundí, Palmira y Yumbo
Área metropolitana de	Barranquilla, Galapa, Malambo, Puerto Colombia y Soledad

Barranquilla	
Gran Cartagena	Cartagena, Arjona, Clemencia, Mahates, María la baja, San Estanislao, Santa Catalina, Santa Rosa, Turbaco y Villanueva
Área Metropolitana de Bucaramanga	Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta
Área metropolitana de Centro Occidente AMCO	Pereira, Dosquebradas y La Virginia

Fuente: Libro Blanco 2008

Además del crecimiento demográfico, otro factor que influye en el aumento de la demanda de transporte será el cambio de la distribución por edades de la población. La población adulta es la que puede tener acceso al vehículo privado, pero además viaja un mayor número de kilómetros al día que los más jóvenes o que la población de la tercera edad.

Por otro lado, se ha demostrado que existe una fuerte dinámica en la relación actividades – transporte, y dado que son las actividades el motor económico y social de las ciudades, siempre se ha buscado disminuir los tiempos de recorrido para que el tiempo perdido en movilidad sea el mínimo posible y se puedan desarrollar de una forma más eficiente las diferentes actividades; lo anterior induce a intervenir el sistema de transporte urbano buscando mejorarlo, no obstante al obtenerse mejorías en el sistema de movilidad, el ser humano tiende a buscar otro tipo de ventajas que le presenta el territorio, por ejemplo una mejor ubicación geográfica, estableciendo cada vez una mayores distancias entre actividades y produciendo la expansión de la ciudad.

Al analizar dicha dinámica, se tiene que ésta es un ciclo sin fin, pues al tenerse un mejor sistema de transporte, seguramente se tendrán menores tiempos en

movilidad, pero a su vez, al haber menores tiempos en movilidad, se tiende a distanciar cada vez más las actividades.

2.1.2. Situación de la demanda.

La demanda de movilidad en las ciudades colombianas ha aumentado y seguirá aumentando significativamente en las próximas décadas, varios factores explican este fenómeno: el crecimiento de la población, el aumento de la proporción de adultos y el crecimiento económico. El aumento de la motorización de los hogares colombianos genera una mayor demanda de movilidad. Por otro lado, la cantidad de viajes que una persona quiere realizar aumenta con el ingreso, esto se refleja en la situación en que el número de viajes de las personas de estratos altos es superior al de los estratos bajos, situación similar con la movilidad de los países desarrollados en comparación con la de los países pobres.

En estudios realizados por Escobar García [7] se encuentra que las ciudades grandes incrementarían su nivel de movilidad individual en un 54% en promedio, al pasar de 1,57 viajes por habitante en 2005 a 2,13 en 2040. En el caso de Bogotá se tendrá el crecimiento más notable, llegando a 2,32 viajes por día, esta tasa es similar a la que existe hoy en día en Santiago de Chile y Sao Paulo, y aún está muy lejana de las tasas de movilidad de ciudades que, como Londres y París, están en promedio en los 3,5 viajes diarios por persona.

En el caso de las ciudades intermedias la situación que se pronostica es que se pase de un promedio de 1,3 viajes diarios por habitante a 1,6 en el 2020, esto muestra que la movilidad de las ciudades intermedias será por lo menos igual a la que exhiben hoy las grandes ciudades del país. En promedio estas ciudades llamadas intermedias tienen hoy unos 440.000 viajes al día [2]. Este valor se incrementará aproximadamente a 635,000 en el 2020, pero estos números no son nada comparables con el promedio de viajes de las grandes ciudades que supera

los 4,5 millones [7], pero si generan un interés especial pues en cerca de 15 años estas ciudades tendrán que manejar casi el doble de su movilidad actual.

Otro factor importante a tener en cuenta en esta caracterización es la situación de las motocicletas en las ciudades del país, las cuales están mostrando un crecimiento más rápido que el número de carros, reforzado con el incremento del mototaxismo en las ciudades intermedias, al convertirse la moto en un instrumento de trabajo importante, en la tabla y en la figura a continuación se muestra las proyecciones para la tasa de motorización tanto de automóviles y motocicletas para Colombia.

Tabla 4. Proyección de la motorización en Colombia

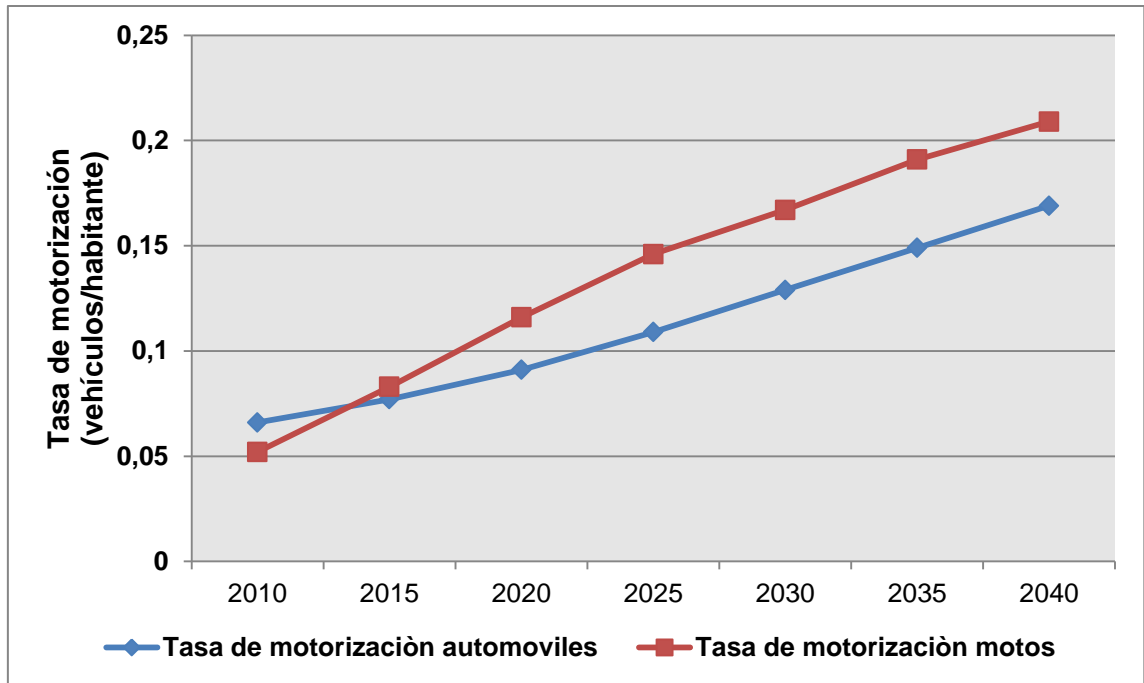
Año	Población (millones de habitantes)	Carros		Motos	
		Tasa Motorización (Vehículos/habitante)	No. Vehículos	Tasa Motorización (Vehículos/habitante)	No. Vehículos
2010	45,5	0,066	2,99	0,052	2,35
2015	48,2	0,077	3,71	0,083	3,99
2020	50,9	0,091	4,62	0,116	5,92
2025	53,6	0,109	5,86	0,146	7,82
2030	56,3	0,129	7,28	0,167	9,39
2035	59,0	0,149	8,8	0,191	11,27
2040	61,7	0,169	10,42	0,209	12,93

Fuente: Acevedo, Bocarejo (2008)

Si se analiza la situación desde el punto de vista de los modos de transporte que usan a diario los ciudadanos, se puede observar que el transporte público juega

un papel importante, lo que deja pensar en la búsqueda de acciones que permitan su fortalecimiento y crecimiento, en búsqueda de la disminución de los viajes en transporte particular.

Figura 3. Proyección de tasas de motorización en Colombia



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tabla 4

En la siguiente tabla se expresan datos de la evolución de la distribución modal para las principales ciudades colombianas.

Tabla 5. Evolución de la distribución modal en ciudades colombianas

Año	1.994	1.997	2.002	2.007	2.020
Ciudad	Bogotá (1)	Bogotá (2)	Bogotá (3)	Bogotá (4)	Bogotá (5)
Transporte Público	77,3%	78,0%	75,0%	53,4%	60,9%
Transporte Privado	22,7%	22,0%	25,0%	25,8%	39,5%
Transporte Autónomo	---	---	---	14,0%	---
Otros	---	---	---	6,8%	---

Total	100%	100%	100%	100%	100%
Año	2.002	2.004	2.006	2.002	2.005
Ciudad	Medellín (6)	Medellín (7)	Medellín (8)	Cali (3)	Cali (9)
Transporte Público	44,4%	1.741.180	60,0%	65,0%	53,7%
Transporte Privado	16,8%	---	12,0%	35,0%	46,3%
Transporte Autónomo	38,8%	---	16,0%	---	---
Otros	---	---	12,0%	---	---
Total	100%	1.741.180	100%	100%	100%
Año	2.003	2.003	2.004	2.002	
Ciudad	Pereira (3,10)	Cartagena (11)	Barraquilla (3,12)	Ibagué (3)	
Transporte Público	66,0%	---	69,0%	77,0%	
Transporte Privado	20,0%	---	31,0%	23,0%	
Transporte Autónomo	---	---	---	---	
Otros	14,0%	---	---	---	
Total	100%	485.000	100%	100%	

Fuente: Escobar (2008)

2.1.3. Situación de la oferta.

La oferta de transporte consiste en un conjunto de medios que permiten realizar transporte y que pueden clasificarse del siguiente modo:

- La infraestructura: las vías destinadas a la circulación
- Los medios de transporte: los vehículos
- La forma en que ambos son gestionados

La oferta de transporte urbana suele calificarse por su capacidad, entendida ésta como la cantidad de personas que pueden trasladarse en un determinado período de tiempo. Desde un punto de vista exclusivo de la infraestructura, la capacidad suele medirse como la cantidad de vehículos que puede circular por un sitio determinado en un cierto período de tiempo; este parámetro tiene significación cuando se trata de analizar la congestión; sin embargo, no debe perderse de vista

que lo que realmente interesa en una ciudad es permitir el traslado adecuado de las personas que lo requieran.

La relación entre la disponibilidad de vías de comunicación terrestre y el nivel de desarrollo de la población ha sido objeto de un amplio número de estudios. Es claro que contar con un mayor acceso a más y mejores carreteras facilita el desplazamiento de la población más pobre hacia otros territorios [8]. La facilidad en el desplazamiento permite ampliar el mercado de productos, especialmente agrícolas, ofrecer mano de obra, acceder a servicios médicos básicos, así como también a servicios de educación de mejor calidad.

En Colombia, desde el punto de vista de las áreas rurales, que son precisamente las que menor infraestructura de transporte poseen, la carencia de vías de comunicación hace que sea muy difícil, y por lo tanto muy costoso, llevar sus productos de un lado a otro para su comercialización. En el caso de las áreas urbanas, son los barrios más rezagados los que sufren por la carencia no sólo de vías de comunicación adecuadas sino de los servicios de transporte necesarios que les permita una movilización rápida y económica, causando en muchos casos la aparición de los servicios de transporte informal.

De acuerdo a cifras del Ministerio de Transporte del año 2007, el país contaba con cerca de 162.000 km de vías que conformaban el total de la red vial nacional. La red primaria estaba conformada por algo más de 16.000 km (aquella que está a cargo de la nación), 71.000 kms correspondientes a la red secundaria (aquella que se encuentra a cargo de los departamentos), y cerca de 60.000 kms correspondientes a la red terciaria. Dada la carencia de recursos por parte de los entes municipales, la nación, a través del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), se hizo cargo de cerca de 26.000 km de la red terciaria, mientras que los restantes 35.000 siguen a cargo de los municipios [9].

En cuanto a la calidad de las vías, de acuerdo a cifras del Ministerio de Transporte en el 2007, del total de la red nacional pavimentada, el 59% se encontraba en buen estado, el 36% en regular estado y el 5% en mal estado. Por otro lado, Colombia es uno de los países con menor número de kilómetros de carreteras por cada mil habitantes, cerca de 3.5, por debajo de países como Brasil (10), Costa Rica (9), Argentina (5.5), Chile (5.2) y Venezuela (4.1), entre otros [10]. Si se hace el cálculo teniendo en cuenta únicamente las vías pavimentadas, Colombia no alcanza ni siquiera 1 kilómetro por cada mil habitantes (0.4). Esto deja ver claramente la necesidad de adoptar medidas que mejoren la cantidad y calidad de la actual red vial del país.

Es usual que el desarrollo de la red vial este rezagado frente a los requerimientos establecidos en los instrumentos de planificación de las ciudades como son los Planes de Ordenamiento Territorial, a pesar de que en algunas ciudades como el caso de Bogotá se ha evidenciado un crecimiento importante en la infraestructura para los modos no motorizados [11], lo que beneficia a los grupos poblacionales de menores ingresos y mejora la salud pública, sin embargo los planes viales están lejos de los alcances previstos por los instrumentos de planificación.

Esto no significa de ninguna manera que las ciudades colombianas no inviertan en forma importante en este sector. De hecho es uno de los principales rubros de las administraciones municipales. Pero la construcción de nuevas y robustas infraestructuras viales no se vislumbra como una solución única y definitiva para el problema de inmovilidad de las ciudades, pues esto se volvería insostenible a largo plazo, dados los altos costos de inversión que se tendrían que realizar y la capacidad financiera de los diferentes municipios, por otro lado, no hay mucha consistencia entre la velocidad en la cual se construyen las obras y el índice de crecimiento del parque automotor que entra al sistema.

Además se debe tener en cuenta es que en la mayoría de las ciudades medias colombianas, y también en las grandes ciudades, han surgido zonas determinadas de un alto intercambio económico y localización de empleos, lo que las convierte en zonas altamente receptoras de viajes, concentrando así los destinos de viajes de un buen porcentaje de la población, sumando a ello que por lo general estas zonas de concentración de negocios poseen valores del suelo muy altos; como consecuencia de ello, al proyectar los corredores por donde se prestará el servicio de transporte, éstos coinciden con las zonas de mayores limitaciones físicas (en cuanto a espacio), y dado que el valor del suelo es alto, hace que el costo intervenir en las infraestructuras de estas zonas sea mucho más elevado que intervenir en infraestructuras que estén en la periferia.

Se puede concluir en cuanto a este tema que muchas de las ciudades a nivel mundial no han logrado mantener tasas de crecimiento de la infraestructura vial siquiera parecidas a las tasas de crecimiento de la demanda, de hecho muchas tienen dificultades para mantener en buen estado la infraestructura existente. Este reto puede enfrentarse desde una precisión de provisión de capacidad adicional para manejar la demanda existente y potencial [7] y esto lleva a su vez a preguntarse acerca de los principios sobre los cuales se desarrollaran en el futuro las fuentes de financiación para la inversión, el destino de los recursos disponibles, la capacidad administrativa y de gestión para ejecutarlos y la relación de la capacidad instalada con la demanda.

2.2.LA BUSQUEDA DE UNA MOVILIDAD ADECUADA EN LAS CIUDADES COLOMBIANAS

A medida que aparece la congestión, una opción para combatirla es aumentar la oferta de transporte. Las acciones sobre las vías y los vehículos, y la forma de operarlos, son medidas en el ámbito de la oferta. Mejorar cualquier componente de la oferta permite obtener beneficios por menor congestión.

2.2.1. Medidas de gestión de la oferta y la demanda.

En primera instancia, suele considerarse la ampliación de capacidad de la red vial como forma de desahogo de la acumulación de vehículos. Tradicionalmente, en torno de la infraestructura se han concentrado los mayores esfuerzos técnicos para atenuar o eliminar la congestión y muchas de las medidas que se plantean tienen como objetivo mejorar las intersecciones o las vías. Grandes y costosas obras, como el ensanche o construcción de vías de características generosas o la construcción de pasos a desnivel, cuentan con favoritismo a la hora de buscar soluciones, aunque muchas veces no representan un aporte duradero.

En todo caso, no deberían menospreciarse múltiples pequeñas intervenciones, porque encierran en sí un gran potencial de beneficios que se obtendrían mediante diseños adecuados, como la rectificación de cruces o el mejoramiento de la señalización.

También es posible actuar sobre el tamaño de los vehículos o la forma en que se aprovecha su capacidad, con miras a un uso más eficiente del espacio vial, de donde surgen iniciativas como buses de gran capacidad en avenidas de mucha afluencia de pasajeros, taxis colectivos, autos compartidos y otras.

El tercer componente de la oferta es el de la gestión, que brinda un sinnúmero de opciones cada vez más amplias, debido al desarrollo de modernas tecnologías. Excelentes aportes para enfrentar la congestión se derivan, por ejemplo, del ajuste conjunto de los ciclos de los semáforos, de esquemas de prioridad para buses, de un manejo flexible de los sentidos de circulación, y de sistemas eficientes de información a los usuarios.

No es difícil comprender que los tres componentes de la oferta están estrechamente ligados entre sí. Las medidas sobre ellos pueden y deben complementarse para proveer mayores capacidades y atenuar la congestión en el corto plazo, siendo clave la elección de paquetes adecuados.

Se tiene entonces que en lugar de contribuir al desarrollo urbano planificado, la evolución del transporte urbano ha contribuido a patrones de crecimiento desordenados, y ha incrementado los niveles de accidentalidad y contaminación, encontrando que históricamente, los mayores esfuerzos para corregir las deficiencias de los sistemas de transporte han contribuido marginalmente a su mejoramiento y al de la movilidad urbana.

Las medidas sobre la oferta y la demanda están destinadas a mejorar la movilidad y las posibilidades de desplazamiento en la ciudad. Sin embargo, por importante que ellas sean, hay otros valores urbanos esenciales que salvaguardar, como son la habitabilidad y calidad de vida. De ahí la importancia de considerar en todos los casos el impacto urbano asociado a cada medida,

En este sentido, como respuesta para contrarrestar esta situación muchas ciudades en el mundo, incluyendo en esa lista, las ciudades colombianas, se enfrentan a cinco grandes retos [12], que deben superarse con un enfoque integrado:

- *Ciudades con circulación fluida:* Hay que reducir las repercusiones negativas de la congestión, al tiempo que se garantice un correcto funcionamiento económico de las zonas urbanas. Para ello se debe promover la marcha a pie y en bicicleta, sacar la máxima ventaja al uso del vehículo privado y regular la distribución de mercancías en las zonas urbanas.
- *Ciudades más ecológicas:* Ante los problemas medioambientales crecientes de las ciudades por las emisiones a la atmósfera y por la generación de ruido, se plantean algunas actuaciones para su mitigación, entre las que se encuentran la aplicación de nuevas tecnologías de vehículos limpios y eficientes, el fomento de la conducción ecológica, la utilización de combustibles alternativos y, en algunos casos, la restricción del tráfico y los peajes urbanos.

- *Transporte urbano más inteligente:* Las aplicaciones de los sistemas inteligentes de transporte (SIT) no se aprovechan totalmente en la gestión eficaz de la movilidad urbana. En el caso de nuestro país la limitante económica que existe para su implementación es la principal barrera, pero la propuesta consiste en la adquisición de equipos tecnológicos que faciliten el control y la gestión del tránsito.
- *Acceso al Transporte urbano:* El transporte colectivo debe satisfacer las necesidades de movilidad básicas y de accesibilidad de los ciudadanos. Para ello, debe ser eficaz, flexible, accesible y de calidad, para así poder competir con el transporte privado. Además, resulta imprescindible una coordinación equilibrada de la ordenación del territorio y un planteamiento integrado de la movilidad urbana.
- *Transporte urbano seguro y protegido:* Garantizar la seguridad en los desplazamientos diarios es un objetivo que deberían cumplir todos los sistemas de transporte. En este sentido, las políticas de seguridad vial deben hacer hincapié en hacer unas infraestructuras más seguras y protegidas, promover unos vehículos más seguros y concienciar a los ciudadanos sobre su comportamiento.

Todas estas propuestas planteadas pretenden ayudar a crear una nueva cultura de la movilidad urbana, en la que una educación, formación y concienciación mayores desempeñen un importante papel.

En la búsqueda de medidas de gestión de la demanda sobresale una que se ha venido implementado en muchos países del mundo y que en nuestro país no ha sido ajeno a dicha tendencia (aunque en Colombia en muchas ciudades aún se encuentran en etapas de estudio), dicha medida es la implementación de tarifas para gestionar la movilidad, estas consideraciones se centran en introducir

mayores costos de movilidad por medio de la fiscalidad, la tarificación de parqueaderos y uso de peajes [13], cuyo objeto es la de crear nuevos hábitos sobre modos, tiempos y destinos de desplazamiento, a fin de mejorar la seguridad en las carreteras, el medioambiente, la accesibilidad, fortalecer el transporte público, construir nueva infraestructura o reparar la existente, reducir la contaminación, entre otros muchos aspectos, todo encaminado a mejorar la movilidad de los habitantes de un sector específico o ciudad.

La tarificación de sitios de estacionamiento es quizás una de las políticas más comunes y sutiles empleadas en nuestro territorio, para el control y reducción de la incidencia de los vehículos en zonas urbanas y por consecuencia en la red viaria. La tarificación es una medida de cobro por el estacionamiento del vehículo en el sitio de parqueo, asociada a la gestión de los parqueaderos, y vinculada estrechamente a la disponibilidad de distintas alternativas (parqueaderos en periferia o disuasorios, transporte colectivos disponibles, etc.).

La localización, la oferta y la tarificación de los sitios de estacionamiento no solo resultan ser relevantes sobre la forma urbana (reparto de suelo y accesibilidad), y en el desarrollo económico local, sino que tienen gran influencia sobre las decisiones adoptadas por el individuo sobre los modos de viaje, puntos de destino a seleccionar y/o el horario de viaje empleado. Lo que confirma la importancia de una correcta gestión y tarificación de los parqueaderos en la consecución de comportamientos de movilidad deseados. Cuestión por la cual a menudo se presenta como alternativa y sustituto a los peajes viarios.

Sin embargo, es cierto también que las variaciones de tarificación pueden llegar a provocar consecuencias no deseadas para la localidad generando mayor congestión urbana por motivo del incremento de movilidad de vehículos en circulación, por ejemplo a causa de la limitación horaria de estacionamiento, y puede ser incluso origen de tendencias de deslocalización sobre la actividad económica local.

El término de tarificación o peaje viario es una forma de canón directo que se utiliza para pagar por el uso que se hace de una determinada infraestructura vial, como son las autopistas, túneles, o el acceso a una determinada área urbana como ocurre en algunas ciudades europeas. Es relativamente una nueva forma de peaje, que está aflorando en distintos lugares, como es el caso de Londres y Estocolmo, en los que se ha establecido una tasa o peaje de congestión. La finalidad de la misma, es la de gestionar y tratar reducir los niveles de congestión que se generan por el aumento de vehículos motorizados, especialmente acentuada en determinadas zonas y en los accesos a centros urbanos de grandes ciudades, conocido como road pricing [14],

Asimismo, Europa está presenciando un fuerte incremento de los flujos de mercancías transportadas por carreteras, a la cuales se quiere aplicar un nuevo canón, popularmente conocida como la Euroviñeta.

El objetivo de este peaje es que los vehículos pesados contribuyan al mantenimiento de las infraestructuras de las cuales están haciendo uso, dado la nula contribución que hacen los vehículos de mercancías en determinados territorios en los que están de paso.

Aunque la implementación de estas metodologías trae consigo la aparición de barreras, ya que la implantación de un sistema de tarificación requiere que los distintos sectores (económico, social, político, ambiental, etc.) estén sintonizados con los objetivos que se esperan alcanzar con dicho sistema, en estudios y publicaciones realizadas por Salas Rondón [15], se han identificado barreras como cuáles y cómo deben ser tarifadas las carreteras, el grado de diferenciación de las tarifas por grupo de usuarios, la forma de invertir esos ingresos y qué medidas complementarias no tarifadas se aplicarían, además de barreras tecnológicas y legales.

En fin existe un gran número de modelos y metodologías para hacer de esta medida, una alternativa eficaz teniendo en cuenta los factores propios de la zona

en que se quiera implementar un ejemplo de ello es el modelo planteado por Salas, Robusté y Saurí [16], donde se muestra el grado de efectividad de la implementación de esta medida en el área metropolitana de Barcelona.

Por último, la financiación adecuada de los proyectos de transporte urbano requiere la combinación de instrumentos presupuestarios, normativos y financieros. En este sentido, todas las partes interesadas, tanto administraciones locales, regionales, nacionales y comunitarias, como usuarios, deben aportar su grano de arena.

Las medidas mencionadas anteriormente, están encaminadas a la consecución de una movilidad adecuada para las personas, mucho más que para los vehículos, ya que al final los principales usuarios del espacio tienen que ser las personas y ese es tal vez el error que se comete al proponer y diseñar soluciones a problemas de congestión pensando solo en el vehículo, en esta investigación se presenta una solución novedosa que se muestra como una medida de gestión de la oferta, pero que en el fondo encierra todo una serie de beneficios tanto para los vehículos como para peatones.

3. CARACTERIZACIÓN DE INTERSECCIONES VIALES

Las intersecciones son puntos en que se cruzan dos o más vías. Normalmente, son las intersecciones las que definen la capacidad de las vías, ya que por constituir puntos comunes a dos o más de ellas, deben dar paso alternado a movimientos conflictivos, lo que significa una disponibilidad menor de tiempo que en los tramos rectos o arcos. De ahí que las intersecciones se congestionen primero y, en definitiva, pasen a ser cuellos de botella o restricciones operacionales para el conjunto. Por ello, las intervenciones sobre las intersecciones tienen un gran potencial de beneficios para la fluidez del tránsito.

En este capítulo se presenta una descripción de las características más sobresalientes de las intersecciones viales en Colombia, los principales conflictos que se presentan en su operación, para luego realizar la presentación de las intersecciones tipo diamante, su uso en el mundo y sus características operacionales.

3.1. ASPECTOS GENERALES

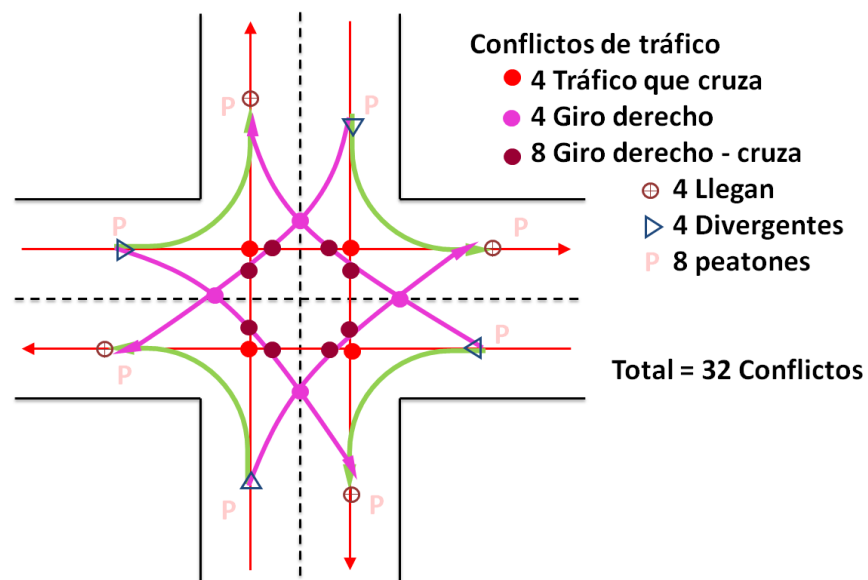
Los accidentes de tránsito en intersecciones viales constituyen la primera causa de muerte para la población entre los 15 y 29 años y según proyecciones será la quinta causa probable de muerte a nivel mundial en el 2030; en el caso colombiano es la segunda causa de muerte para esa población .

En nuestro país a diario los conductores se tienen que enfrentar al hecho de tomar decisiones rápidas en una intersección vial teniendo en cuenta su destino, la geometría de la intersección y la velocidad a la que puede circular, un error en el conductor genera accidentes o demoras, mientras que una inadecuada concepción de la intersección conlleva a problemas de capacidad de la intersección.

Además hay que tener en cuenta que los conflictos en una intersección están en función del tipo de intersección. Por ejemplo, para una intersección de 4 entradas (como la mostrada en la figura 4) el número de conflictos entre movimientos que quieren ocurrir en el mismo tiempo y en el mismo espacio son 32; en cuanto a los vehículos se puede enumerar que hay 4 conflictos para los movimientos frontales, 4 para los giros a derecha, 4 para los giros a izquierda, 8 por conflicto entre los giros a derecha y los frontales, 4 conflictos por tráfico convergente y 4 por divergente. Mientras que por parte de los peatones habría 8 conflictos.

Para solucionar estos problemas las intersecciones deben tener algún tipo de control que vele por la seguridad y eficiencia en la movilidad tanto de los vehículos como de los peatones. Existen dos tipos de control de intersecciones, uno donde se comparte el tiempo y otro donde se comparte el espacio. La decisión sobre cuál tipo de control escoger depende del volumen del tráfico, la geometría de la intersección, el costo asociado y la importancia de la vía.

Figura 4. Conflictos en una intersección



Fuente: Mathew y Krishna (2007)

3.1.1. Niveles de control en intersecciones.

Existen tres tipos de niveles de control de intersecciones, los cuales están dados en función del grado de control que hay sobre el conductor por parte de la agencia de tráfico. En el nivel pasivo no hay ningún tipo de control sobre el conductor y este tiene la libertad de maniobrar según desee, en el semi-controlado el conductor tiene cierta libertad, y por último, en el activo los movimientos que pueda hacer el conductor están controlados en su totalidad.

- **Nivel Pasivo**

Este tipo de control se emplea cuando los volúmenes de tráfico son bajos y no se requiere mayor control. El conductor está obligado a cumplir únicamente con las normas básicas viales y se instauran señales de tráfico y marcas en la vía como complemento al control sobre la intersección. A continuación se presentan dos tipos de control pasivo.

- **Sin control:** Solo se obliga al conductor a cumplir con normativas viales básicas tales como que los conductores que van al lado izquierdo de la vía deben esperar y que se debe dar prioridad a los movimientos frontales que a los giros.
- **Señales de tráfico:** Este tipo de control emplea señales de tráfico de advertencia y orientación que aseguren el cumplimiento de las normativas viales básicas. Para citar unos ejemplos de señales de tráfico tenemos el “Ceda el paso” que obliga al conductor que transita sobre la vía de menor volumen a reducir la velocidad para dar paso al vehículo que viene en la vía de mayor tráfico; el “Pare” donde se obliga al conductor que transita sobre la vía de menor tráfico a detener su marcha para esperar a avanzar cuando no haya conflictos con otras vías de mayor tráfico; y finalmente, un pare que

obliga a que todos los conductores que llegan a la intersección se detengan y den prioridad al vehículo de la derecha.

- **Marcas adicionales a las señales de tráfico:** Son marcas sobre la vía que complementan al control por señales de tráfico, destacándose las líneas de pare, las flechas que indican los giros y de espera.

- **Nivel semi-controlado**

Como se mencionó anteriormente este nivel de control guía al conductor a evitar posibles conflictos dejándole ciertas libertades. Como ejemplo de este tipo de control están la Canalización y las Glorietas.

- **Canalización:** El tráfico es separado para que transite por distintos caminos, para ello se emplea un separador físico como una isla que es una porción de vía elevada y ubicada en el medio de la carretera. En algunos casos este tipo de control permite reducir considerablemente los conflictos de tráfico.
- **Glorietas:** El tráfico es conducido a desplazarse alrededor de una isla central (glorieta) en una sola dirección, con esto se busca eliminar conflictos entre movimientos frontales o giros a derecha (o izquierda) por conflictos de menor importancia como lo son los conflictos divergentes y convergentes. La orientación del giro alrededor de la glorieta puede ser en la dirección de las manecillas del reloj o contrarias a su movimiento; en el primer caso el giro a izquierda es permitido y los giros a derecha y frontales se ven obligados a seguir el camino alrededor de la glorieta, mientras que en el segundo caso el giro a derecha es permitido y los giros a izquierda y frontales se ven obligados a seguir el camino alrededor de la glorieta.

- **Nivel activo**

Este tipo de control implica que el conductor debe seguir el camino señalado por la agencia de control del tráfico sin poder maniobrar como él lo desee. Los ejemplos

más notorios de este tipo de control son las señales de tráfico y las intersecciones separadas por elevación.

- **Señales de tráfico:** Este tipo de control está basado en el concepto de compartir tiempo, ya que en ciertos intervalos de tiempo (fases) se permiten unos movimientos mientras que al mismo tiempo se restringen otros que podrían entrar en conflicto. Para este tipo de control se debe contar con dos o más fases, según sean las condiciones de tráfico en la intersección. Existen dos formas de operar este tipo de control: mediante tiempos fijos y mediante señales activadas por los vehículos. En el primer caso, todas las fases conservan una duración y el número de fases se conserva, teniendo así ciclos fijos que no se adaptan a las necesidades de tráfico sobre la intersección. Por otro lado, las señales activadas por los vehículos tienen una concepción más dinámica pues se ajustan a las condiciones de tráfico. Su funcionamiento parte de un detector ubicado en la vía antes de llegar a la intersección, el cual se activa con el paso de los vehículos y transmite la información capturada a un controlador. Según la información de tráfico registrada el controlador regula el tiempo de las fases y la duración de los ciclos.
- **Intersecciones separadas por elevación:** Hay dos posibles opciones para este tipo de control que corresponden a intersecciones “A nivel” o a intersecciones separadas por elevación, en la primera todas los movimientos sobre la intersección ocurren a una misma altura mientras que en el segundo hay diferencia de alturas entre los posibles movimientos; en cualquiera de los dos casos se maneja el concepto de compartir espacio, puesto que ningún movimiento entra en conflicto con otro por interferir espacialmente. Las ventajas de estas intersecciones es que aumentan la capacidad de la intersección y reducen la accidentalidad ya que permiten que los vehículos se desplacen a altas velocidades y no hay posibilidades de que los vehículos que siguen distintos giros entren en conflicto. Sin

embargo, sus costos son elevados, por ende se emplea particularmente en autopistas.

3.1.2. Intersecciones semaforizadas

Los semáforos son una forma más sofisticada de controlar una intersección. Permiten separar los períodos de tiempo en que se puede avanzar por cada calle que llega a una intersección. La distribución de tiempos se denomina reparto, en tanto que ciclo es el tiempo transcurrido desde el inicio de una determinada fase hasta que ella vuelve a activarse.

En general, el semáforo tiende a ser considerado como una medida positiva, que produce beneficios y mejora la seguridad en cualquier situación. No obstante, esta creencia no siempre se ve corroborada. Para que la instalación de un semáforo produzca beneficios reales a la población tiene que darse un conjunto de condiciones que permitan que los beneficios efectivamente sean mayores que los costos. Por ejemplo, dada la variabilidad de la demanda, es posible que un semáforo tenga plena justificación en ciertos períodos del día y en el resto constituya un costo para la comunidad [12].

El estudio de los costos y beneficios es un trabajo técnico complejo que puede facilitarse mediante el apoyo de modelos computacionales. No obstante, con miras a simplificar el análisis, diversos países han adoptado requisitos o estándares mínimos para justificar la instalación de semáforos, cuyo cumplimiento garantiza en general lo correcto de la decisión. Estos requisitos consideran, entre otros aspectos, volumen vehicular, volumen peatonal, accidentes

Según el manual de señalización del Ministerio de Transporte del 2004 [17], existen unas condiciones para la instalación de semáforos, las cuales son:

- Condición A: Volumen mínimo de vehículos.

- Condición B: Interrupción del tránsito continuo.
- Condición C: Volumen mínimo de peatones.
- Condición D: Movimiento o circulación progresiva.
- Condición E: Antecedentes y experiencia sobre accidentes.
- Condición F: Combinación de las condiciones anteriores.

En las siguientes tablas se muestran cada uno de los parámetros a considerar para cada una de las condiciones mencionadas anteriormente.

Tabla 6. Parámetros de semaforización para la condición A

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 mas	1	600	150
2 o mas	2 o mas	600	200
1	2 o mas	500	200

Fuente: Manual de señalización 2004

Tabla 7. Parámetros de semaforización para la condición B

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 mas	1	900	75
2 o mas	2 o mas	900	100
1	2 o mas	750	100

Fuente: Manual de señalización 2004

Para la condición C, se da si se tiene que durante un día representativo en la calle principal se verifican los siguientes volúmenes de tránsito, para un período de dos horas:

- Si entran 1.200 o más vehículos en la intersección (total para ambos accesos), o si 1.600 o más vehículos entran a la intersección en la calle principal, cuando existe separador central con ancho mínimo de 1,20 m.
- Si durante el mismo período pico, cruzan 250 o más peatones en el cruce de mayor volumen correspondiente a la calle principal.

Para la condición D, el control del movimiento progresivo a veces demanda la instalación de semáforos en intersecciones en donde en otras condiciones no serían necesarios, con el objeto de regular eficientemente las velocidades de grupos compactos de vehículos.

Se satisface el requisito correspondiente a movimiento progresivo en los dos siguientes casos:

- En calles con circulación en un solo sentido o en calles en las que prevalece la circulación en un solo sentido y en las que los semáforos adyacentes están demasiado distantes para conservar el agrupamiento compacto y las velocidades deseadas de los vehículos.
- En las calles de doble sentido de circulación, cuando los semáforos adyacentes no proveen el adecuado agrupamiento de vehículos ni el control de la velocidad y el semáforo propuesto junto con los adyacentes pueden conformar un sistema progresivo de semáforos

Para la condición E los requisitos relativos a los antecedentes sobre accidentes se satisfacen sí:

- Una prueba adecuada de que otros procedimientos menos restrictivos, que se han experimentado en otros casos satisfactoriamente, no han reducido la frecuencia de los accidentes.

- Ocurrieron cinco o más accidentes en los últimos doce meses, cuyo tipo sea susceptible de corregirse con semáforos y en los que hubo heridos o daños a la propiedad con valor mayor a treinta veces el salario mínimo mensual legal vigente en el país.
- Existe un volumen de tránsito de vehículos y peatones no menor del 80% de los requerimientos especificados en la condición de volumen mínimo de vehículos, en la condición de interrupción del tránsito continuo o en la condición de volumen mínimo de peatones.
- La instalación no interrumpe considerablemente el flujo progresivo del tránsito.

3.1.3. Coordinación de semáforos

La coordinación de semáforos es una de las formas más eficientes de reducir demoras, consumo de combustible, contaminación y accidentes. La coordinación consiste en establecer ciclos, repartos y desfases en una vía o red, de manera tal que los vehículos puedan desplazarse a una cierta velocidad, procurando que las interrupciones generadas por luz roja sean mínimas.

Los parámetros más importantes que deben considerarse para la coordinación de un sistema son el ciclo, que normalmente será común para todos los semáforos coordinados, el reparto o distribución de tiempos en verde, y el desfase, que es el período que transcurre entre el comienzo de una fase específica en un semáforo y su comienzo en la intersección siguiente [18],.

Además de estos parámetros básicos, existe un conjunto de condiciones que deben resolverse en la medida en que el eje o red a coordinar aumenta en complejidad, todo lo cual puede ser asistido por herramientas de modelación para representar y optimizar cada caso

La unidad básica para coordinar es un eje, corredor o vía. Cuando se trata de ejes sencillos unidireccionales es posible utilizar técnicas gráficas o “banda verde” [18], obteniéndose programaciones normalmente fijas, calculadas sobre la base de

datos históricos de flujos y velocidades. Pero en casos bidireccionales con intersecciones espaciadas irregularmente, puede ser difícil e incluso imposible determinar una “banda verde” sin interrupciones y que satisfaga la demanda. Desde luego, la coordinación de redes es simplemente imposible de plantear con dicho método.

En los últimos 30 años se ha producido un extraordinario desarrollo tecnológico, que mediante la incorporación de la computación y la electrónica al manejo de complejas situaciones de tránsito, ha permitido el control de amplias redes, con sistemas centralizados y flexibles en relación con la demanda [19]. Programas como SIGOP, COMBINATION METHOD y TRANSYT han cambiado completamente la forma de enfrentar el problema, proveyendo capacidades antes insospechadas para avanzar en la optimización de los sistemas de tránsito. En particular, TRANSYT ha sido ampliamente probado en muchos países, y ha llegado a constituir prácticamente un estándar internacional para la coordinación de redes

➤ *Coordinación con planes fijos*

Esta modalidad requiere de controladores de semáforos con suficiente capacidad para recibir y administrar las instrucciones de los planes preestablecidos. Éstos se generan externamente por medio de mediciones de flujos, siendo recomendable instalar tantos planes como períodos de operación relevantes puedan detectarse. Es condición fundamental en este caso disponer en cada controlador de relojes que funcionen con la frecuencia de la red o relojes de cuarzo de gran precisión, de manera que el desfase pueda ser adecuadamente programado y mantenido en el tiempo [20]. Alternativamente, puede considerarse la conexión vía cable entre controladores, en cuyo caso el sistema trabaja con un reloj común.

La coordinación con planes fijos se originó en una etapa en que la computación, las comunicaciones y la tecnología de detección no eran aún suficientes para proveer soluciones más ajustadas a situaciones complejas de variación de demanda e interacción de redes. Ello no significa que dicha modalidad esté

necesariamente obsoleta. El análisis de cada caso dirá si es posible resolver adecuadamente una determinada necesidad de control con planes fijos, atendiendo a las condiciones de la demanda y los costos involucrados.

➤ *Coordinación flexible o mecánica*

Las soluciones de coordinación flexible en función de la demanda son útiles en áreas de tránsito intenso, habitualmente sometidas a interferencias no predecibles. Esta modalidad se basa en la detección en tiempo real de los flujos relevantes que llegan a cada intersección; estos datos son procesados “en línea” por un computador central, el que determina planes actualizados de ciclo de semáforos, que son transmitidos a los controladores de cada intersección [21].

El sistema es bastante sofisticado, pues además del computador central equipado con programas computacionales apropiados y de semáforos con controladores capaces de obedecer las instrucciones, requiere de comunicación directa entre la central y el controlador de cada intersección.

Entre las opciones más conocidas en esta materia está el sistema inglés SCOOT y el australiano SCAT

3.2.INTERSECCIONES VIALES

De acuerdo a la forma de solucionar el encuentro con otras vías surge la clasificación de los diferentes tipos de enlaces viales o intersecciones, las diferentes soluciones geométricas dependen del ángulo de las vías que se interceptan, del número de ramales que se encuentran y las dimensiones de estos. De acuerdo con estas variables la forma de solucionar el cruce se puede realizar de forma radial, perpendicular o de lazo, es por ello que hay numerosas formas de intersecciones, las más frecuentes se muestran a continuación:

➤ *Enlaces giratorios:*

La solución que permite poner en relación la confluencia de más de cuatro ramales de diferentes dimensiones y diferente ángulo de intersección es la de geometría circular. Se caracteriza por la presencia de un elemento central que direcciona los movimientos de cruces frontales, giro a la izquierda, giro a la derecha de forma oblicua evitando los cruces perpendiculares. La posición de estos puntos en la red y las dimensiones del espacio que conforman permite el emplazamiento de elementos simbólicos y también el emplazamiento de edificaciones de mayor jerarquía.

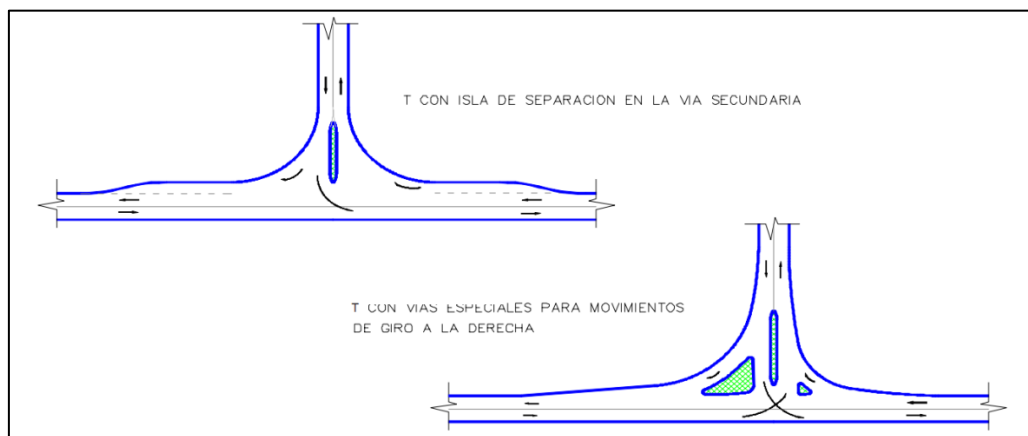
➤ *Intersecciones en T o Y*

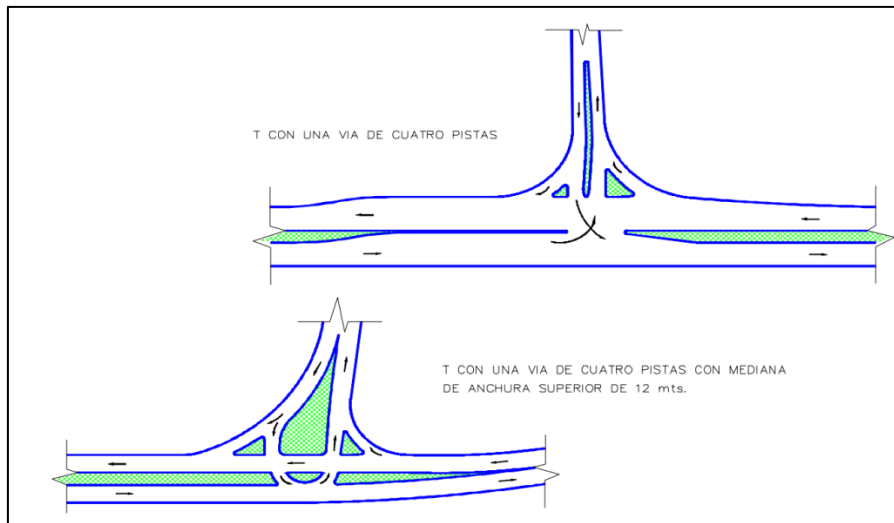
Conformadas por tres ramas

Estas, como su nombre lo indica son los tipos de cruce donde el ángulo de intersección de las vías es igual a 90° , y el número de estas varía entre dos y tres. El trayecto de cada vía no se interrumpe como en el caso de los ejes giratorios (donde cada vía produce dos ramales en el punto de cruce) y esta se considera como un solo eje.

A diferencia del enlace giratorio el área de exposición es inferior y se reduce a los ángulos de las esquinas. Estos puntos son los más favorecidos en términos de exposición.

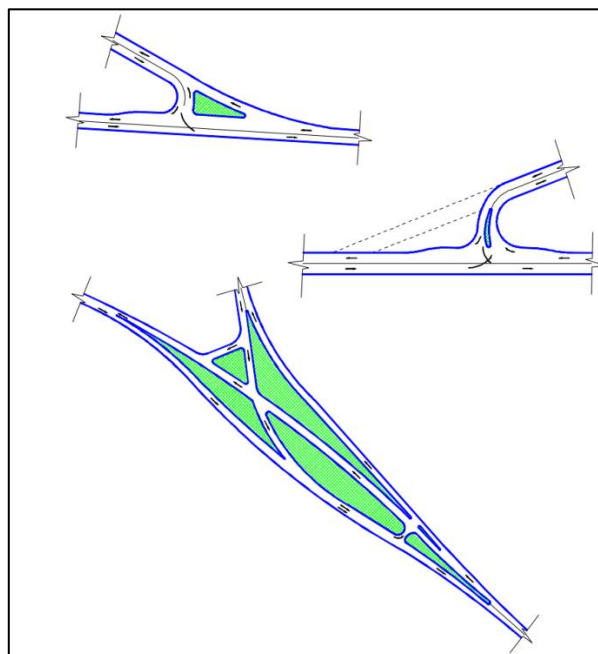
Figura 5. Intersecciones en T





Fuente: Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN),
 Recomendaciones para el diseño del espacio vial urbano, Santiago de Chile,
 2001.

Figura 6. Intersecciones en Y

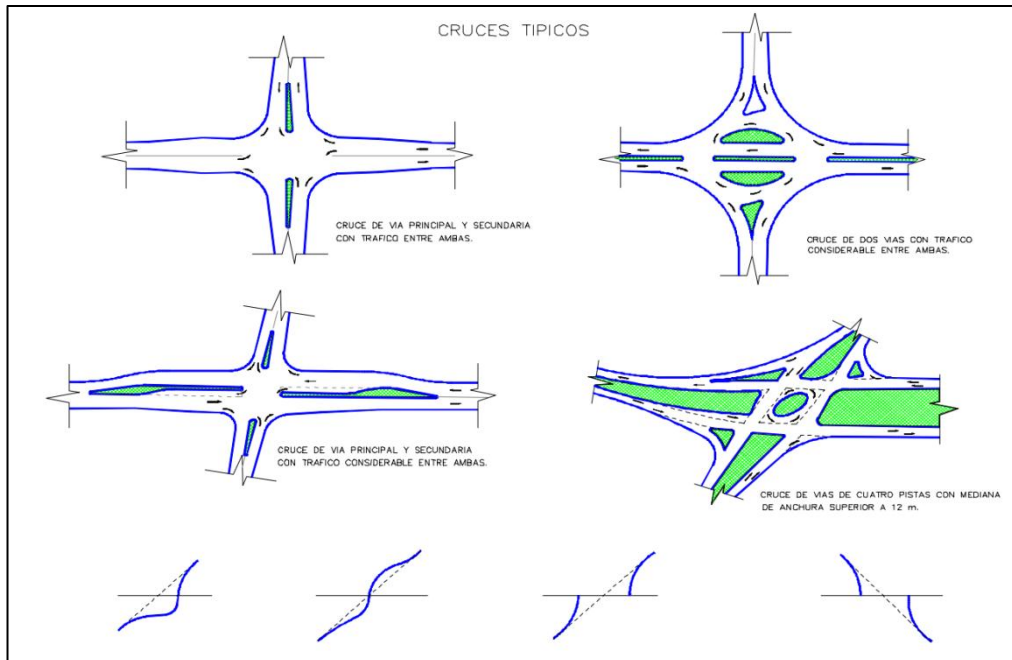


Fuente: Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN),
 Recomendaciones para el diseño del espacio vial urbano, Santiago de Chile,
 2001.

➤ *Intersecciones en cruz o cruces*

Conformadas por cuatro ramas que semejan una cruz.

Figura 7. Intersecciones en cruz



Fuente: Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN), Recomendaciones para el diseño del espacio vial urbano, Santiago de Chile, 2001.

➤ *Intersecciones múltiples*

Compuestas por más de cuatro ramas, constituyen el caso más difícil de tratar; por lo general, es preferible suprimir una de las ramas, empalmándola con otra fuera de la intersección, si ello es posible.

➤ *Rotondas o glorietas*

Este tipo de solución consiste en empalmar las ramas sobre un anillo circular, elíptico o similar, por el que los vehículos giran hasta llegar a la rama de salida; para esto, pueden tener que trenzarse en uno o más puntos con los flujos provenientes de otros ingresos y destinados a otras salidas. No deben emplearse

semáforos y la preferencia corresponde al que viene por el anillo (por la izquierda de quien ingresa).

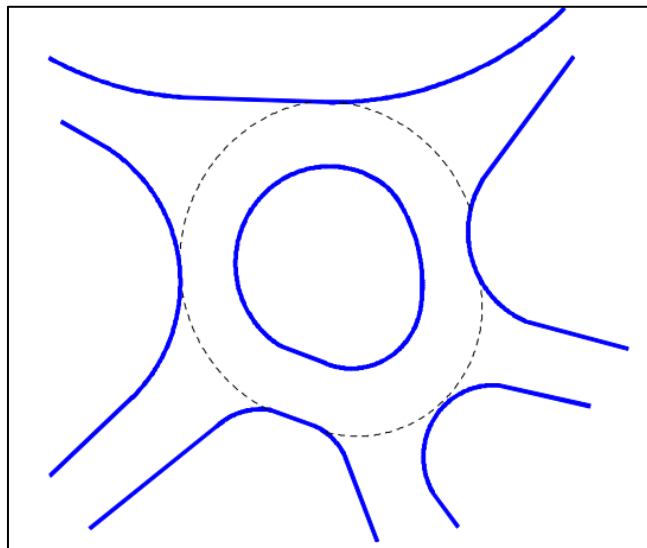
Un caso particular de este tipo de solución es la minirotonda, caracterizada por una reducción considerable del tamaño de la isla central, cuyo diámetro puede llegar a ser menor que cinco metros.

Las glorietas tienen ventajas y desventajas y muy poco se emplean en carreteras, a no ser en zonas suburbanas o en cercanías a los pueblos. Se deben considerar condiciones de seguridad y en especial de iluminación nocturna.

En ámbito rural debe extremarse el cuidado en el diseño del alineamiento en planta de los accesos, escalonando adecuadamente las curvaturas para disminuir las velocidades.

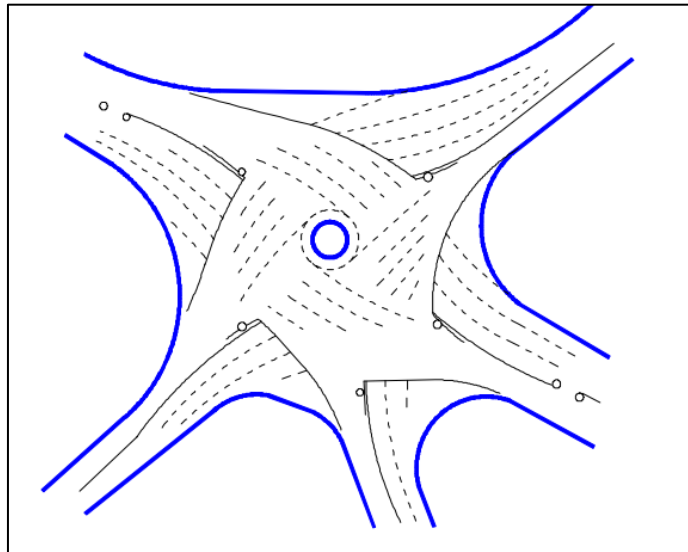
La glorieta dispone de una isleta central, circular, que permite a los vehículos que penetran a la intersección por cualquiera de sus ramales abandonar la misma por el ramal elegido mediante un giro alrededor de dicha isleta. En la siguiente figura se muestra un esquema de una glorieta convencional.

Figura 8. Glorieta o rotonda



Fuente: Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN),
Recomendaciones para el diseño del espacio vial urbano, Santiago de Chile,
2001.

Figura 9. Minirotonda



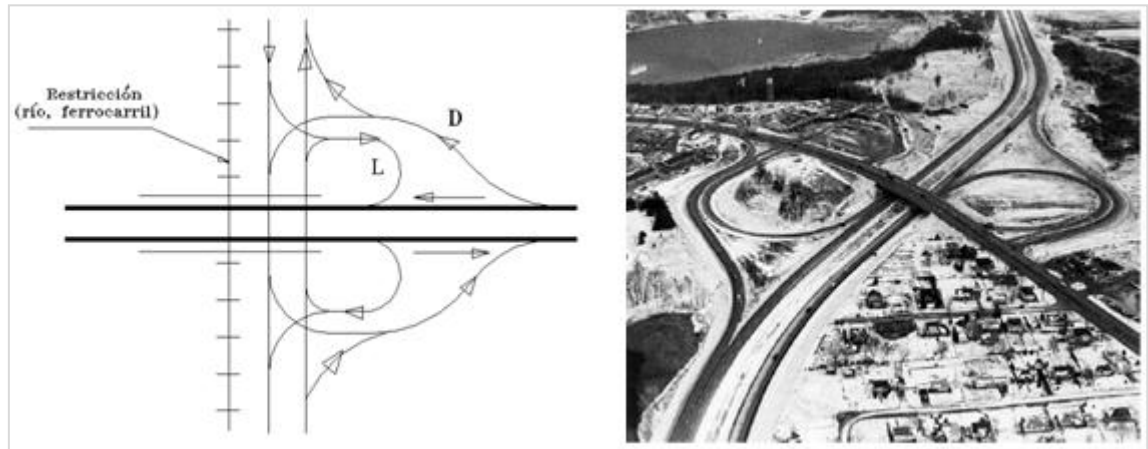
Fuente: Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN),
Recomendaciones para el diseño del espacio vial urbano, Santiago de Chile,
2001.

➤ Tréboles parciales:

Se define el trébol parcial como una intersección de cuatro ramales con condición de parada, en el que se ha hecho continuo un giro a la izquierda mediante una vía de enlace. En general el trébol parcial, es apropiado cuando sólo pueden utilizarse algunos cuadrantes del área de cruce por existir obstáculos topográficos en las vías rurales, lo que ocurre frecuentemente.

En el trébol parcial las entradas y salidas a la derecha suelen corresponder siempre a la vía principal, para lo cual es preciso ocupar cuadrantes del mismo lado de la vía secundaria o cuadrantes opuestos por el vértice [22].

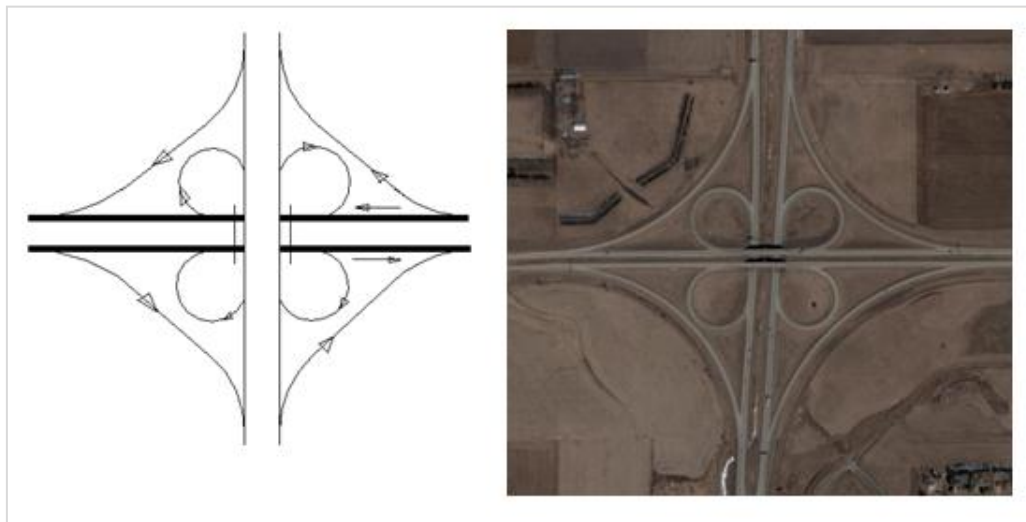
Figura 10. Intersección tipo trébol parcial



Fuente: AASHTO2001

➤ Tréboles completos:

Figura 11. Trébol completo



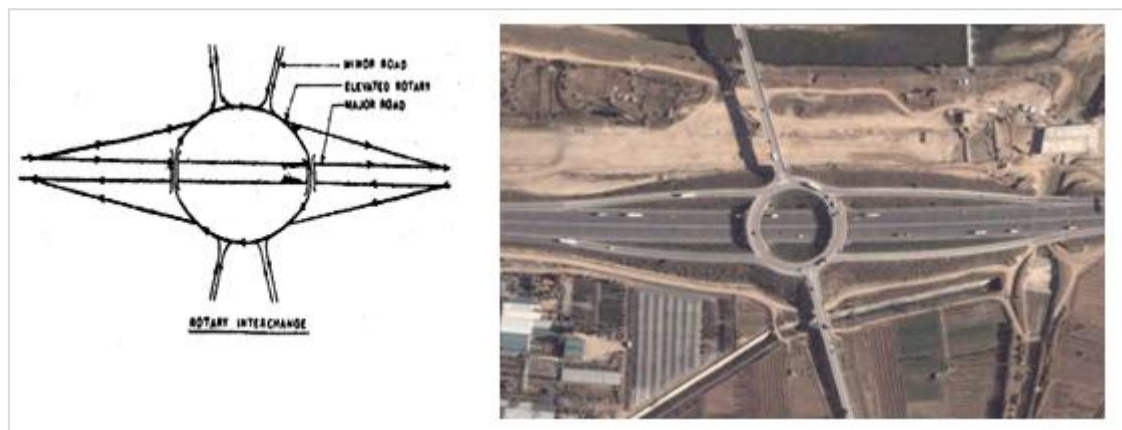
Fuente: AASHTO2001

Los tréboles completos, son aptos para vías rurales de importancia similar (autopistas, vías de primer orden) por la considerable área que ocupan. Son intersecciones de cuatro ramales y triple circulación, requieren una sola estructura y todos los giros a la izquierda se resuelven por medio de vías de enlace y los giros a la derecha mediante ramales directos.

Por su conformación, un trébol mejora la velocidad de diseño, con lo que aumentan los radios y el recorrido; por lo que no convienen vías de enlace de excesivas dimensiones. El límite de un trébol suele ser la capacidad de las vías de enlace, que rara vez funcionan bien con más de un carril y normalmente se saturan con volúmenes de 1.000 a 1.200 vehículos por hora.

➤ Intersecciones Rotatorias:

Figura 12. Intersecciones rotatorias



Fuente: AASHTO2001

Este tipo de diseño es particularmente usado donde un número de caminos se intersecan en la intersección y donde el espacio es lo suficientemente grande para construirla. Esta requiere la construcción de dos puentes y generalmente necesita más espacio que una intersección tipo diamante. El camino principal va por encima o por debajo de la intersección rotatoria y los cambios de movimientos son acomodados por una rampa diagonal [22].

La capacidad de una intersección rotatoria es similar a la de una intersección rotatoria a nivel. Las operaciones de alta velocidad no pueden ser mantenidas sobre un camino menor a causa de la usualmente corta distancia de entretejido.

De cualquier modo estas operaciones pueden mantenerse satisfactoriamente a bajas velocidades sobre el camino menor. También este tipo de diseño supone solo una pequeña distancia de viaje adicional para el tráfico que interseca, lo cual es una ventaja específica cuando el movimiento lento del tráfico está presente.

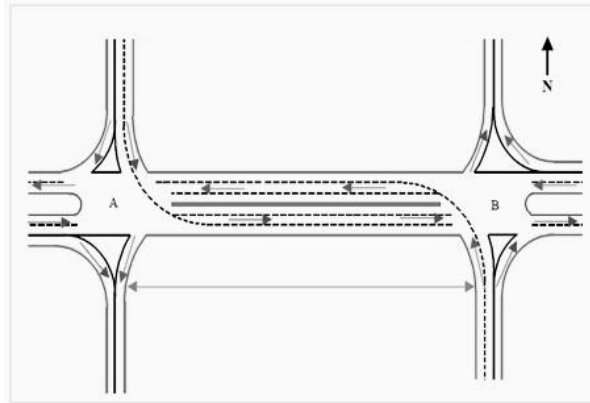
3.3. INTERSECCIONES DIAMANTE

Además de los tipos de intersecciones mostrados anteriormente existe otro tipo utilizado en diferentes países, las cuales son conocidas como intersecciones diamante y que son el tema central en esta investigación.

3.3.1. Contexto histórico

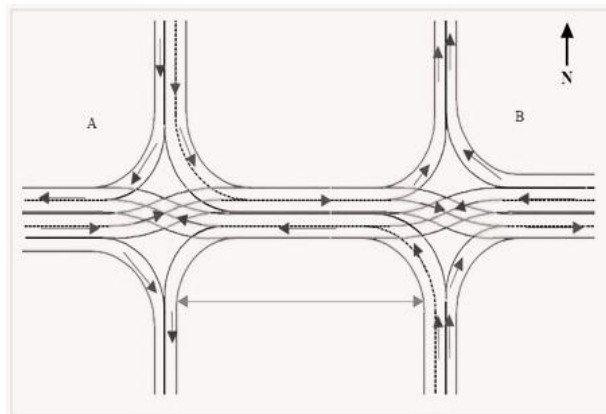
En el mundo existen numerosas soluciones novedosas para disminuir los problemas que se presentan en las intersecciones viales, pero mucho de estas soluciones representan grandes inversiones [23], convirtiéndose en alternativas inalcanzables para el caso de países en vía de desarrollo. En esta búsqueda de soluciones eficientes y económicas aparece una alternativa conocida como Diamond Interchange (DI) que es una solución que conduce el tráfico en sentido opuesto a la dirección normal de la vía [24], se caracteriza por componerse de dos vías de un solo sentido que están separadas por una pequeña distancia que pueden tener o no un tramo interno (ver figura), y que difieren en su operación con respecto a una intersección típica porque los giros a izquierda en ambos sentidos se cruzan, evitando que se atiendan en simultáneo y a su vez existe un mejoramiento a dicho tipo de intersección que es conocido como la Diverging Diamond Interchange (DDI).

Figura 13. Intersección tipo diamante



Fuente: Edara, 2003

Figura 14. Intersección tipo diverging diamond interchange



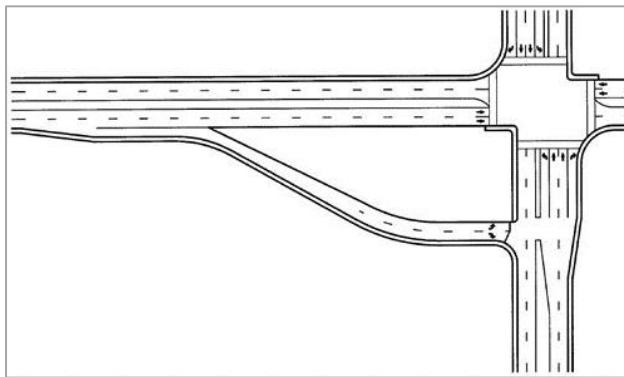
Fuente: Edara, 2003

Este tipo de intersecciones fueron concebidas en Francia a mediados de los setentas, sus antecedentes muestran que se implementó por primera vez en la ciudad de Versailles France en la intersección de la autopista A13 y 182 de RD (Avenida de Jardy), la Intersección de la autopista A4 (avenida des Allies) y el Boulevard de Stalingrado en Le Perreux - sur- Marne y en la ciudad de Seclin en la intersección de la autopista A1 y Encamine a d' Avelin.

En el continente americano en el otoño de 2000, Gilbert Chlewicki, un estudiante de posgrado de primer semestre en la Universidad de Maryland, College Park comenzaba su trabajo de grado para su maestría en ingeniería de transporte, analizaba acerca como algunos diseños de intersecciones provienen de conceptos de intercambiadores.

El ejemplo más destacado es el jughandle, que era una intersección muy común en Nueva Jersey ciudad natal de Chlewicki. El jughandle lleva el concepto de la utilización de una rampa de intercambio para reemplazar a la izquierda en una intersección directa [25]. Así Chlewicki comenzó a buscar en los intercambiadores para determinar si alguno de ellos podría ser convertido en un concepto a nivel. Una intersección única de este tipo existía en la intersección formada por la I-95 con la I-695 en el lado noreste de Baltimore.

Figura 15. Diagrama de una intersección tipo Jughandle



Fuente: Bared, 2004

En la siguiente figura se puede ver la configuración de esta intersección en Baltimore, desde cualquier dirección el diseño es simétrico en todos los lados, la idea de este intercambiador fue tener unas pequeñas rampas de salida manteniendo altas velocidades, buscando hacer transiciones suaves para viajeros quienes salían a otra vía interestatal. Este diseño recibió numerosas críticas en términos de seguridad debidas a las expectativas que tenían los conductores en

cuanto a la operación a altas velocidades. Sin embargo el concepto de este intercambiador fue movido a un grado de intersección, donde los giros izquierdos de carriles izquierdos son esperados y las velocidades son bajas, Chlewicki quería ver lo que sucedería en este tipo de intercambiador si todos los puentes separados fueran sustituidos por las intersecciones a nivel controladas por una señal de tráfico.

Figura 16. Intersección I-95 con I-695 Baltimore



Fuente: Google Earth

El diseño se veía prometedor, pero Chlewicki consideró que la prueba real del diseño sería si era posible garantizar luces verdes a través del diseño una vez que el conductor recibiera la luz verde en primer lugar, se determinó que sólo sería posible sincronizando los movimientos de cada pista e incluso esto sólo era posible si la división del tiempo de la luz verde para ambas direcciones fuera casi idéntico.

El no poder pensar en un lugar donde este diseño a nivel, se pudiera utilizar, decidió modificar el diseño un poco a "desenredar" uno de los caminos, de manera que sólo uno de los caminos se cruzara durante las maniobras de la intersección, la sincronización de las señales podría tener cabida para todos los movimientos

incluidos los giros a la izquierda, llamando a este diseño de intersección "criss-cross" [26] que luego llamo intersección con eliminación dividida sincronizada " (SSP) ya que el diseño tiene características donde se ve una intersección dividida por etapas, pero ambas partes podrían tener el verde al mismo tiempo con la ventaja de la sincronización de señales adicionales. Más adelante cambió el nombre a intercambiador de diamantes divergentes " (DDI), debido a los múltiples puntos divergentes en todo el intercambio.

En un viaje realizado a Francia, Chlewicki tomó una excursión al Palacio de Versalles a medida que su autobús giraba a la izquierda de la carretera para llegar al palacio, Chlewicki se dio cuenta que estaba entrando en un tipo de intersección divergente diamante. Se levantó en total asombro y shock. Él estaba tan feliz porque el concepto que se le ocurrió en realidad era lo suficientemente bueno para estar en uso, pero a la vez un poco decepcionado de que su idea no era original, después de todo.

Chlewicki presentó su investigación en el 2º Simposio de calles urbanas en Anaheim, California, en julio de 2003. Varias personas quedaron impresionadas con la presentación, mientras que otros se mostraron escépticos. Una persona que le impresionó fue Joe Bared, PhD, PE de la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Bared se ha especializado en la investigación de nuevos diseños geométricos en la FHWA y vio el potencial de estos diseños.

El primer estudio hecho por Edara K. Praveen y Bared G. Joe [27] en 2003 evaluaron la DDI y SSP que Bared cambió de nombre, la intersección de cruce doble o DXI en un escenario de volumen alto, medio y bajo. Los resultados fueron aún más prometedores. Tanto la DDI y DXI tuvieron una mejoría significativa respecto a los diseños convencionales en grandes volúmenes.

Al parecer, la primera DDI que se iba a construir en los Estados Unidos iba a ser en Findlay, Ohio en la I-75 y EE.UU. 224. Era la mejor alternativa hasta la

selección final, al parecer, la decisión final se basó en preocupaciones de seguridad de un diseño no probado, que es un miedo común para los nuevos diseños. El siguiente candidato principal para la construcción de una DDI estaba en Kansas City, Missouri en la I-435 intercambio / Front Street. Al mismo tiempo, la FHWA quería estudiar el grado de seguridad de la DDI. Para el estudio, utilizaron sus carreteras como simulador de conducción para evaluar la DDI. Usaron la I-435 / Front Street, encontrando que los conductores eran intuitivamente capaces de maniobrar dentro de la DDI y encontrar el camino hacia su destino.

Don Saiko, PE, que es un gestor de proyectos del área de Springfield, Missouri Distrito de MoDOT, quiso investigar el diseño en el área de Springfield. Él consiguió el permiso para probar el diseño en la I-44 y Kansas Expressway (SR 13).

Un presupuesto de \$ 10 millones de dólares fue concedido para la construcción de este proyecto. Las simulaciones para el diseño fueron muy prometedoras para solucionar el tráfico y los problemas de seguridad. También fue un costo y una solución muy eficaz. La DDI sólo costó alrededor de \$ 3 millones de dólares, ahorrando 7 millones de dólares del costo presupuestado.

Figura 17. Intersección I-44 Springfield Missouri



Fuente: Saiko P.E. 2009

El diseño utilizaba el puente existente donde había cinco carriles en el puente sin aceras y convirtiéndolo en una DDI con cuatro carriles en el puente y una acera muy amplia en la mitad, además debido a que no se necesitaba de construcciones importantes en el puente, el tiempo de construcción tardo 6 meses en lugar de dos años como sucedía con las otras opciones.

El proyecto se terminó a tiempo y dentro del presupuesto, con la apertura de configuración DDI el 21 de junio de 2009 y la ceremonia de corte de cinta para la realización del proyecto el 7 de julio de 2009. El DDI ha sido un gran éxito en este intercambiador y puede considerarse que ha funcionado incluso mejor que lo indicado por los modelos de simulación.

Adicionalmente se han estado realizando investigaciones acerca de su implementación en el Virginia Polytechnic Institute y State University. El Departamento de Transporte de Missouri también está planeando construir 4 intersecciones de este tipo tres en Kansas City y una en St. Louis Country.

La secretaria de transporte de Oregón adelanta los estudios para la construcción de este tipo de intersecciones en un cruce conflictivo a nivel de congestión y seguridad vial de su malla ubicados a la altura de los cruces de 26 mille Road con la M-53 (Macomb County, Michigan).

En la siguiente tabla se muestra un listado de sitios de Norteamérica donde se han realizado estudios para la implementación de este tipo de intersecciones:

Tabla 8. Agencias Norteamericanas que han considerado este diseño

#	Estado	Vías	Ciudad	Estado
1	Ohio	I-75/US 224	Findlat, OH	Declinado
2	New Mexico	I-40/San Mateo Blvd	Albuquerque, NM	Declinado

3	Colorado	I-25/Arapaho Road	Denver, Co	Declinado
4	Ontario	Hwy 447/Rathburn Rd	Toronto, ON	Desconocido
5	Missouri	I-435/Front St	Kansas City, MO	Construcción 2007
6	Oregon	I-5/Fern Valley Blvd	Phoenix, OR	Diseño 2007
7	Oregon	I-5/OR 66	Ashland, OR	Diseño 2007 / 2008
8	Maryland	MD 295/Hanover Road Baltimore-Washington Parkway Anne Arudel Country	Baltimore, MD	Planeación

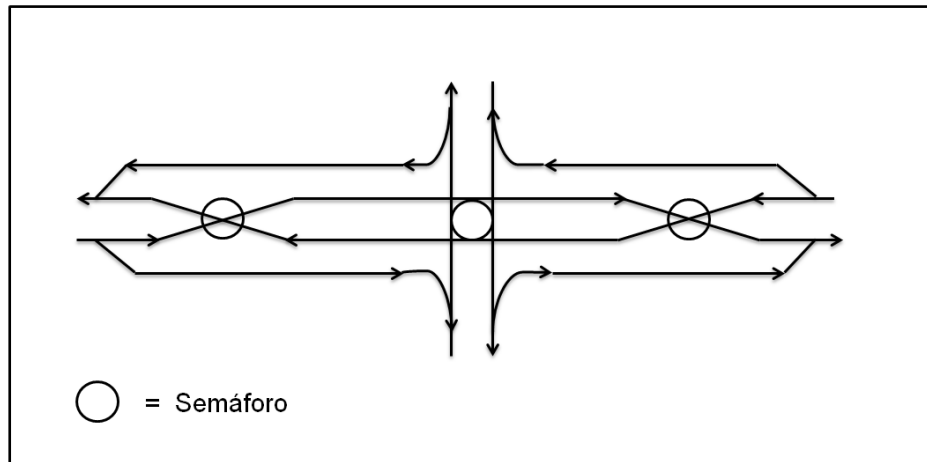
Fuente: Siromaskul (2007)

3.3.2. Consideraciones de diseño geométrico

El desarrollo del diseño de intercambiador de diamantes divergentes (DDI) se hizo a partir del concepto del diseño de la synchronized Split- phasing (SSP).

Algunas de las características del diseño de la SSP son similares al flujo continuo en una intersección. El flujo de tráfico es despejado antes de la intersección principal, sin embargo en intersecciones de flujo continuo se permite que los giros izquierdos crucen sobre la intersección principal, mientras que en la SSP se permiten tango giros izquierdos como movimiento a través del cruce. En orden de simplicidad el diseño hace potencialmente mejor la operación, los cruces de movimientos son eliminados para uno de los caminos, en la siguiente figura se muestra un esquema de la operación de estas intersecciones.

Figura 18.Synchronized Split – Phasing (SSP)

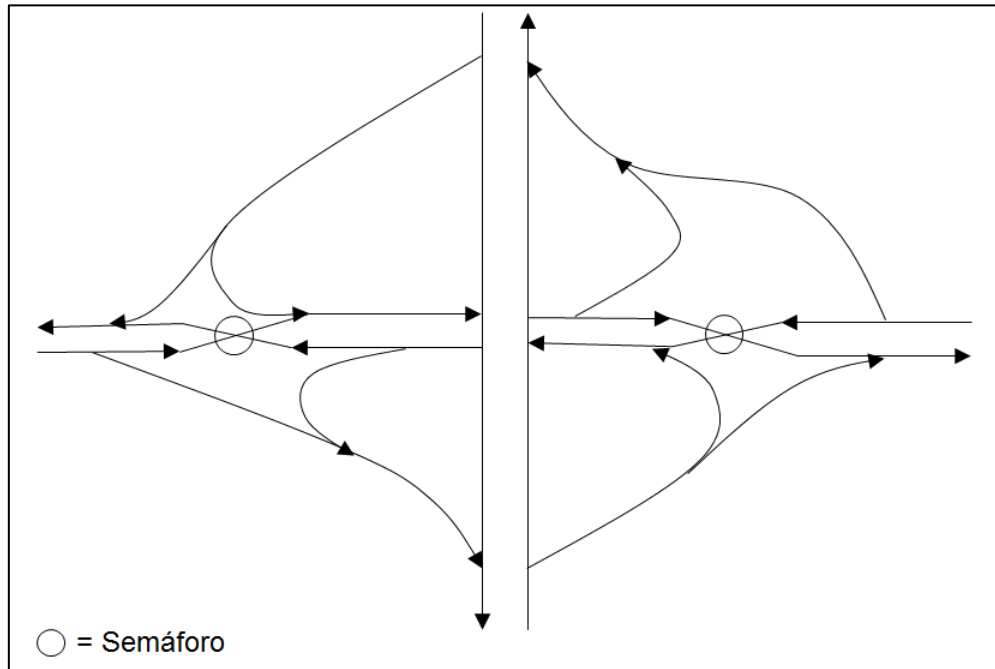


Chlewicki 2003

La idea era usar un cruce de un paso elevado para conformar un intercambiador. El intercambiador diamante convencional parecía ser uno de los diseños más sencillos para crear cruces de movimientos, el principal objetivo es crear una mejor acomodación de los giros izquierdos y eliminar algunas fases para los ciclos semafóricos.

La porción de la vía principal no cambia, pero los movimientos de salida de las rampas cambian por giros izquierdos. Los movimientos a través y los giros izquierdos por el camino arterial, también funcionan de manera diferente a un intercambiador diamante convencional, porque el tráfico cruza en el sentido equivocado entre las rampas de llegada.

Figura 19. Esquema de operación DDI

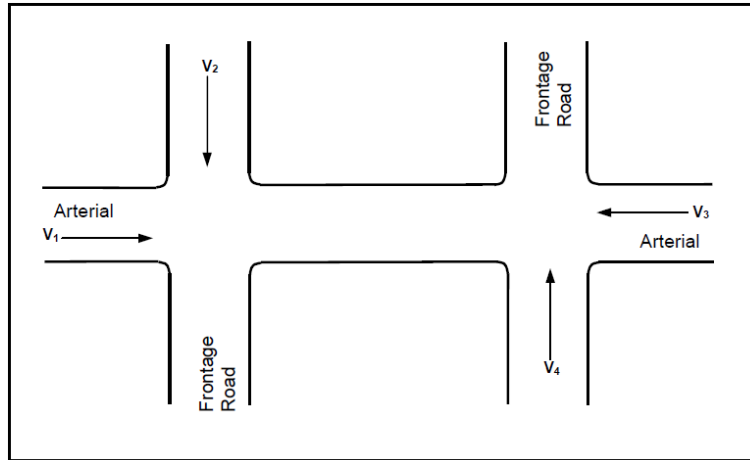


Chlewicki 2003

Los modelos de circulación tienen una influencia importante en el diseño de cruces de diamante. Los conteos deben ser hechos sobre las entradas externas para determinar el número de carriles requerido y la asignación de carriles a cada entrada.

En general un carril debe ser provisto para unos 400 vehículos por hora sobre una entrada. Otra metodología para determinar el número de carriles sobre cada entrada es por el método del carril crítico. Los volúmenes de entrada (V_n) sobre cada entrada son medidos como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 20.Diagrama de volúmenes entrantes



Fuente: Sunkari y Urbanik, 2000

En la etapa de diseño pueden evaluar el número de carriles requerido en un cruce de diamante usando los volúmenes de entrada, dados por la ecuación de Urbanik, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{V_1}{L_1} + \frac{V_2}{L_2} + \frac{V_3}{L_3} + \frac{V_4}{L_4} \leq 1500 \text{ vehiculos/hora} \quad (3.1)$$

Dónde:

$$V_1, V_2, V_3, V_4 = \text{volumenesdeentrada} \left[\text{vehiculos/hora} \right]$$

$$L_1, L_2, L_3, L_4 = \text{numerodecarrilesencadaentrada}$$

➤ *Carriles de giro en U*

En el diseño de las intersecciones diamante algunas veces es necesario considerar la posibilidad de los carriles de giro en U, los cuales mejorarán la operación de tráfico significativamente. Son esenciales para los intercambios estrechamente espaciados, y deben ser suministrarlos para todas las intersecciones con rampas de entrada (frontage roads) de una sola dirección. Se recomienda para este tipo de intersección que el carril del giro en U sea exclusivo para evitar una mayor congestión dentro de la intersección

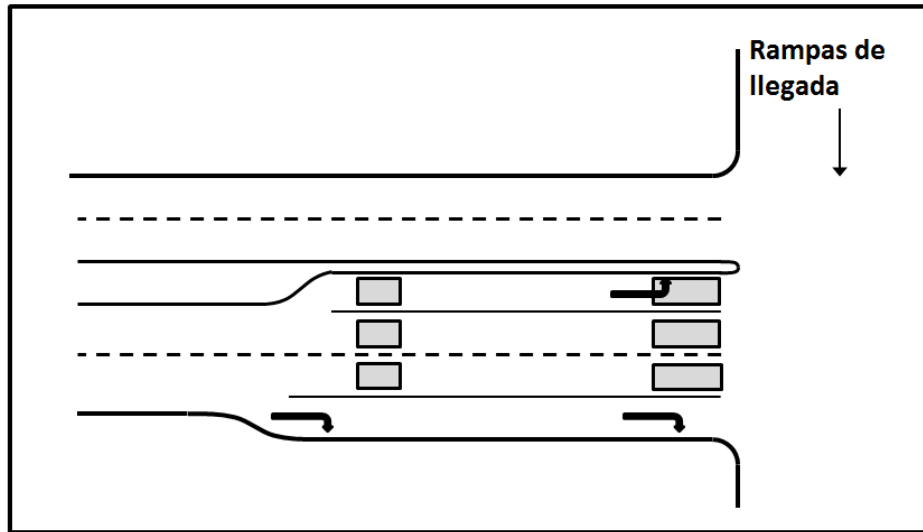
➤ *Rampas de entrada (frontage roads approach)*

La asignación del carril sobre la rampa de acceso debe estar diseñada para soportar la proporción de los movimientos de giro y de los movimientos a través de la intersección. El número de carriles desde los cuales los vehículos pueden doblar a la izquierda es limitado por el número de carriles disponibles en el interior del cruce [28]. Esta limitación puede ser una restricción en la operación del cruce cuando existan tanto altos volúmenes de giro a la izquierda desde las rampas de acceso como altos volúmenes desde la entrada externa que pasan a través de la intersección. Las bahías de giro a la derecha deben ser diseñadas sobre las entradas de las rampas de acceso si el derecho de paso lo permite.

➤ *Entradas arteriales o externas*

Idealmente la entrada arterial debe tener bahías de giro a la derecha. Si la mayoría de los movimientos que van a través de la entrada arterial hacen giro a la izquierda en la señal en la parte de abajo del cruce (a través y el giro a la izquierda), será aconsejable diseñar un carril sobre la entrada arterial para el giro izquierdo en la parte de abajo como se ve en la Figura 21. Este carril adicional resultará en un uso más equilibrado de los carriles y reducirá el cruce de tráfico dentro del diamante entre los vehículos de giro izquierdo y los que van a través de la intersección.

Figura 21.Entradas externas



Fuente: Sunkari y Urbanik, 2000

➤ *Entradas internas*

El número de bahías de giro a la izquierda para los giros izquierdos internos debe estar basado en la magnitud de los movimientos de giro izquierdo internos. Este número puede ser uno o dos carriles basado en el volumen. Algunos organismos también usan una configuración de carril-dividido para los movimientos de giro a la izquierda y paso a través en la entrada interna. La configuración carril-dividido debe ser utilizada cuando carriles de giro en U están presentes y la operación de cuatro fases es empleada en el cruce.

3.3.3. Operación y funcionamiento

Para la operación de este tipo de intersecciones lo fundamental es una buena elección del sistema de fases y a su vez esto va ligado en primer lugar a su geometría, después las condiciones de tráfico a las cuales está sometida, y el derecho a vía, otros parámetros que determinan la selección es el volumen transportado por ciclo para cada uno de los cuatro giros a la izquierda posibles y la capacidad de almacenamiento en las otras vías en espera.

➤ *Patrones de tráfico*

Para la DDI, el tráfico que viene del este tiene una rampa que permite el movimiento de giro derecho antes de llegar al cruce, esta rampa se une con el giro izquierdo de la dirección oeste para proveer una rampa que se conecta con la vía que viene de la dirección sur.

Después del cruce al movimiento que viene del este se une con el tráfico que viene de la dirección sur, circulando por el lado izquierdo, además se puede dejar una salida sobre la izquierda en un movimiento de giro izquierdo que se unirá con el flujo que viene de la dirección norte, esto se puede realizar antes o después de pasar bajo el paso elevado. Cuando ocurre nuevamente el cruce el tráfico que viene del este vuelve al lado derecho y finalmente recibe el tráfico del giro derecho que viene de la dirección norte, este diseño es simétrico para el tráfico que viene del oeste.

Son necesarios dos semáforos para este diseño, una en cada cruce. Cada señal tendrá dos fases, la fase de rampa puede ser combinada con el flujo que no presenta conflicto del tráfico para el camino este /oeste.

La longitud del tiempo verde para la rampa puede no ser igual de largo como el otro tiempo verde en la misma fase, debido a los posibles problemas de colas en la otra señal. Sin embargo el tiempo verde para la segunda señal en una dirección dada puede ser más largo que la otra fase para prevenir la aparición de colas en los giros izquierdos en el segundo tiempo del sistema. La longitud del tiempo verde es para la segunda señal, aunque este tiempo adicional en la señal se asemeja a tres fases.

Como se mencionó anteriormente uno de los factores más determinantes de este tipo de intersecciones es la consideración de las fases semafóricas que regulen y controlen el tráfico, ya que la finalidad es evitar la formación de colas [29], existen teorías acerca de la disposición de las diferentes fases semafóricas en estas

intersecciones, como lo es la metodología del polígono de colas [30] que permite un análisis y una medición visual de las longitudes de cola en una intersección con el fin de definir las fases semaforicas de la misma según la hora del día y del volumen de tráfico [31] este tipo de intersecciones usualmente son controladas por tiempos de ciclo y fases de señalización especiales, existen modelos de fases semaforicas establecidos de este tipo conocidos como el modelo Texas Transportation Institute phasing TTI o de cuatro fases [25], el modelo de Tres fases y el sistema Lead-Lag, que han sido efectivos en la operación de este tipo de intersecciones disminuyendo las grandes colas en las horas pico.

➤ *Sistema de operación de cuatro fases*

Se caracteriza por operar las fases en el sentido de las manecillas del reloj con el fin de garantizar que quien entra a la primera intersección en verde tenga de nuevo una fase verde en la segunda intersección. La principal ventaja es que en este tipo de operación los giros a la izquierda tienen la prioridad, garantizando un flujo rápido al interior de la intersección. Por otro lado, es un tipo de operación bastante eficiente ya que permite el traslapo de dos fases (cerca de 8 segundos) entre los sentidos opuestos de la arteria principal que llega a la intersección, esto se logra gracias a los tiempos de viaje dentro de la intersección.

Otra ventaja que se puede observar es que mantiene el interior de la intersección limpio de tráfico. Esto es de gran ayuda cuando los giros izquierdos están muy cargados de tráfico y el espacio de almacenamiento dentro de la intersección es muy pequeño debido a la proximidad de los dos caminos laterales [32], este tipo de fase es buena para conductores porque siempre provee una luz verde en el otro lado de la intersección, la TTI fase es equivalente a regular intersecciones con fases divididas en ambas calles comúnmente conocidas como “Electric All – Way Stop” [33].

El mayor problema de este tipo de operación es que restringe el flujo en los carriles más externos de la intersección ya que se habilitan los giros a la izquierda pero se limitan los cruces frontales. Esto resulta ser un problema cuando los volúmenes de tráfico son mayores en dirección de la arteria que llega a la intersección.

Para este tipo de operación los ciclos no deben ser menores al doble del tiempo que toma cruzar la intersección pues de lo contrario se provocará embotellamiento de carros en el interior de la intersección. Por otro lado, los ciclos semafóricos no deben ser mayores a lo necesario para proveer equidad en los cruces frontales, considerándose equitativo cuando el grado de saturación en todas las direcciones es semejante.

El modelo de cuatro fases utiliza una fase secuencial Lead-Lead es decir el movimiento de giro izquierdo se dirige a través de los movimientos en ambos lados de la intersección y es así como se minimizan las cola internas, el termino overlap utilizado para describir el sistema de 4 fases es una falsa fase usada con el propósito de garantizar la eficiencia en la progresión del tráfico, este esquema de fase es adecuado para intersecciones diamante que estén en espacios cerrados o con poco espacio.

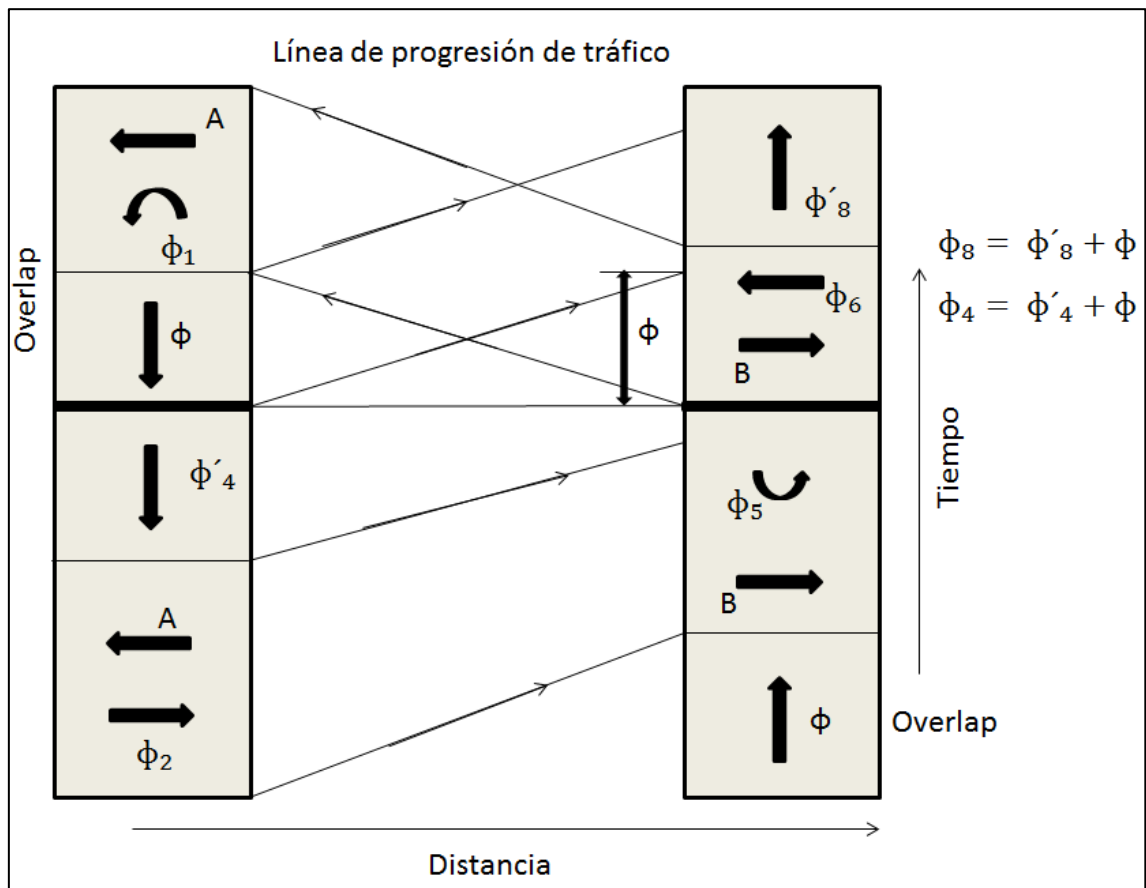
Si la configuración del tiempo de ciclo es adecuada las colas en el interior de la intersección se pueden eliminar completamente con carriles de giro en U, en la figura 22 se muestra la configuración de fases para este sistema de operación.

Adicionalmente, mayores tiempos semafóricos en este tipo de intersección repercute en mayores tiempos de espera que en mayores capacidades de tráfico, por ello no se aconsejan ciclos muy grandes. Con respecto a los demás tipos de operación el TTI se destaca porque reduce tiempos con los “overlaps” o traslapos,

ya que permiten que dos fases distintas trabajen en simultáneo por un corto espacio de tiempo.

Por otro lado, de la geometría se puede decir que el ancho interno de la intersección debe ser tal que se alcance a recorrer en medio tiempo del ciclo que permite el cruce frontal, para evitar congestiones en la parte interna y cuando se den los “overlaps”.

Figura 22.Esquema de operación de cuatro fases



Fuente: Zongzhong (2004)

➤ *Sistema de operación de tres fases*

En el caso de la operación mediante el uso del sistema de señales tipo Tres fases,

todos los movimientos corren simultáneamente y este tipo es más eficiente que la TTI cuando el almacenamiento es adecuado solo la fase adicional es el giro izquierdo interior, provee una gran flexibilidad en la asignación de los tiempos verdes y también permite generalmente ciclos cortos, este tipo de fase solo funciona cuando el interior de la intersección es suficientemente grande para mantener todo los giros izquierdos.

En este tipo de operación se le da prioridad a los cruces frontales los cuales tienen fases simultáneas. Al relegarse a un segundo plano los giros a la izquierda estos se tornan lentos. Dado que en este tipo de operación las fases para los cruces frontales son simultáneas no hay problemas de almacenamiento. A diferencia de un cruce típico con tres fases, este tipo de operación permite aliviar los giros a izquierda por el interior y a su vez mantener cruces frontales, este tipo de comportamiento es conocido como una fase secuencial Lag-Lag es decir se retrasan los giros izquierdos respecto a los movimientos en ambos lados de la intersección haciendo énfasis en la progresión del tráfico a través de la vía arterial.

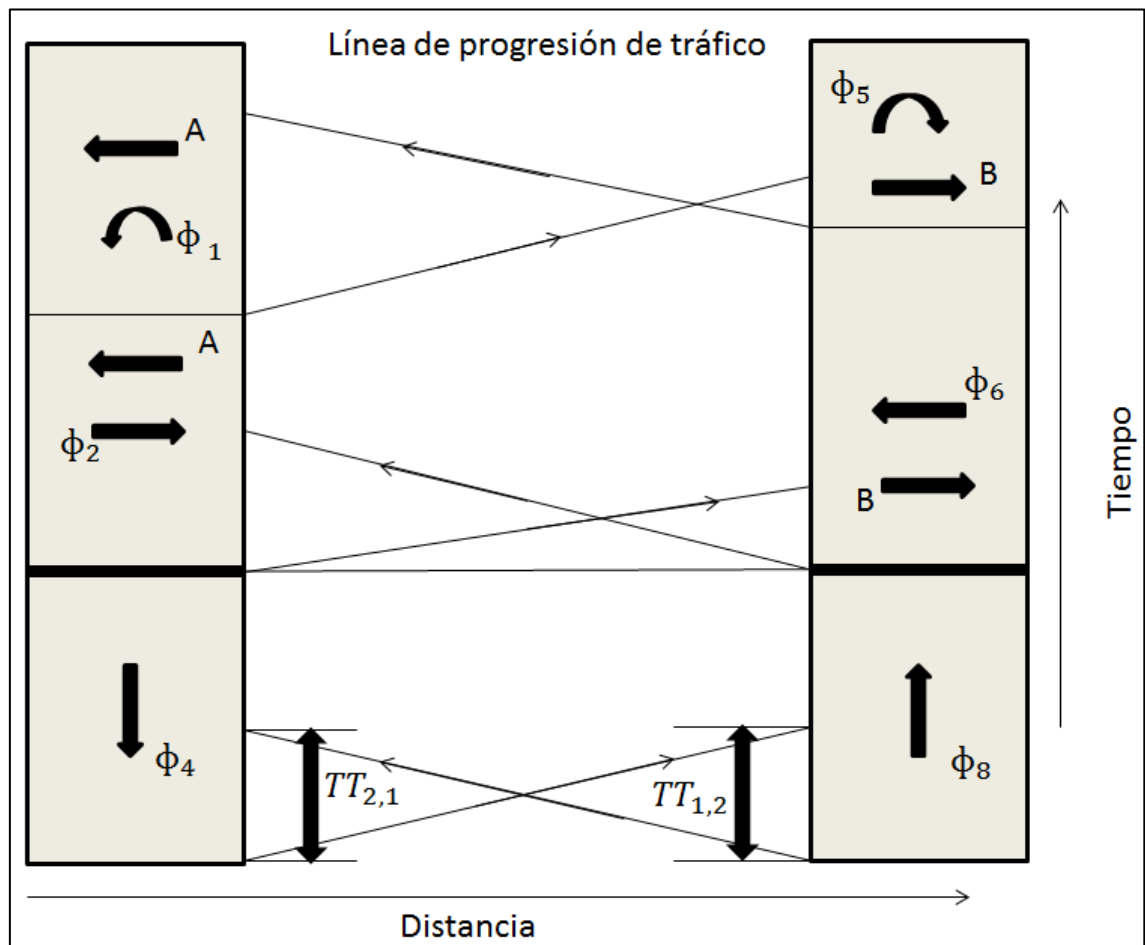
Las fases de rampa (ϕ_4 y ϕ_8) empiezan y terminan al mismo tiempo, seguido por el flujo a través de la vía arterial (ϕ_2 y ϕ_6) y las fases del giro izquierdo interno (ϕ_1 y ϕ_5) tal como se aprecia en la figura 23. La operación de esta mantiene progresivo el tráfico a través de la vía arterial es decir el tráfico que atraviesa la intersección no para.

El tráfico que gira hacia la izquierda puede ser parado pero puede ser despejado por el final del ciclo dando suficiente tiempo de verde para ϕ_1 y ϕ_5 . En conclusión este sistema es apropiado cuando los caminos que llegan tienen demanda de tráficos balanceados y allí hay un gran espacio para almacenar los vehículos que harán el giro izquierdo [34].

Además se aconseja emplear ciclos más pequeños que los demandados por el tráfico [34], con el fin de evitar acumulación de tráfico en el interior de la intersección por parte de los vehículos que giran hacia la izquierda. Adicionalmente, esto garantiza equidad en la saturación en todas las vías que llegan a la intersección.

Con respecto a la geometría cabe resaltar que a mayor espacio interno mejor opera la intersección ya que evita la interferencia de los vehículos que esperan en los giros a izquierda con los vehículos que cruzan frontalmente.

Figura 23. Esquema de operación de tres fases



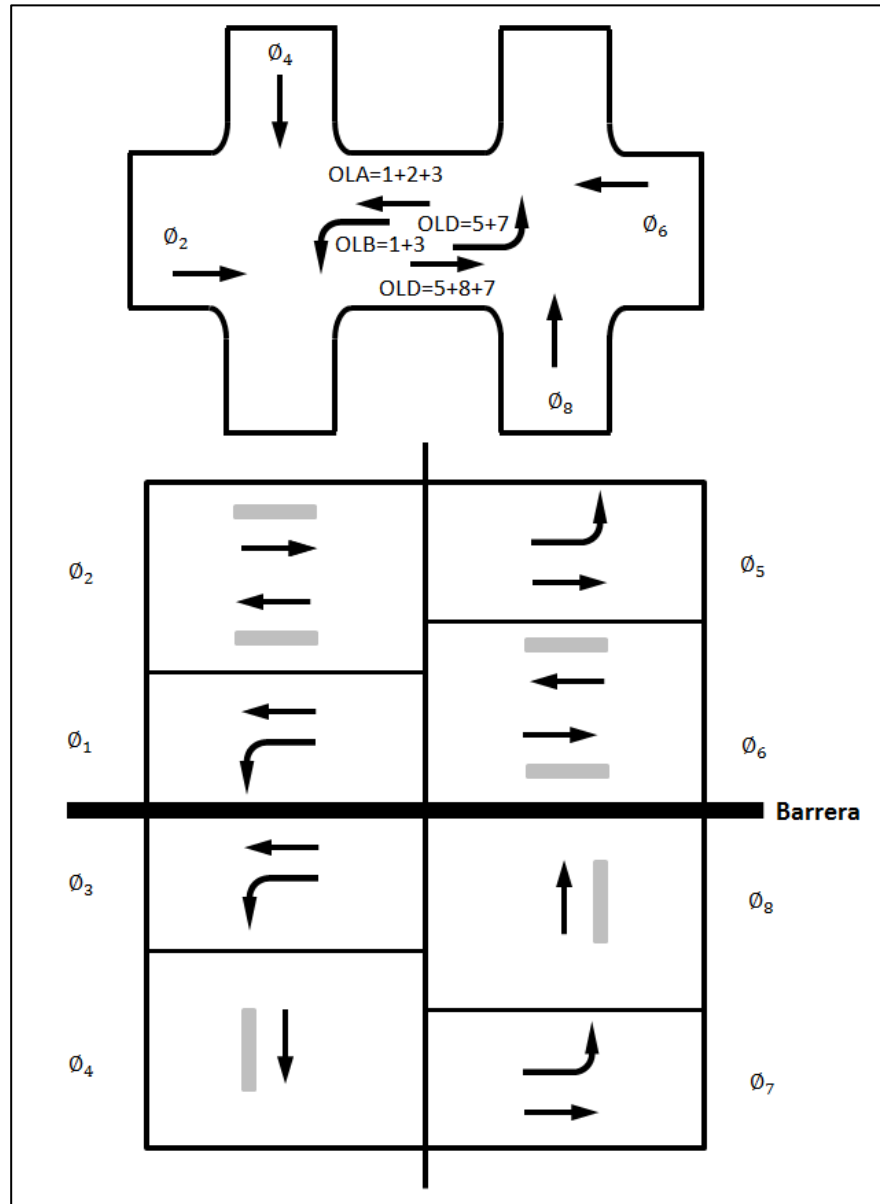
Fuente: Zongzhong (2004)

➤ *Sistema de operación de Lead – Lag*

Cuando las divisiones resultantes del sistema de operación de cuatro fases no resultan eficientes, causan mucha congestión y el almacenamiento es inadecuado para el sistema de operación de tres fases, el sistema de operación Lead-Lag puede venir como una solución alternativa. El giro izquierdo con mayor volumen de tráfico es usualmente mejor atendido por el giro izquierdo retardado de este sistema de operación, porque estos giros izquierdos tienen la menor de las esperas y estos están completamente vacíos antes de que los giros de las rampas de entrada sean atendidos.

Adicionalmente en estas intersecciones las fases de los cruces frontales no son en simultáneo para la primera y la segunda intersección, sino que se inicia primero la fase de la segunda intersección para aliviar el interior de la intersección.

Figura 24. Esquema de operación Lead - Lag



Fuente: De Camp (2003)

En áreas donde las rampas de acceso son comúnmente usados, el espaciamiento entre intersecciones es del orden de 60 mts, lo cual usualmente causa preocupaciones acerca del almacenamiento interior, particularmente por las bahías para el giro izquierdo interior. Para abordar este problema de almacenamiento limitado, la fases TTI's es típicamente usada.

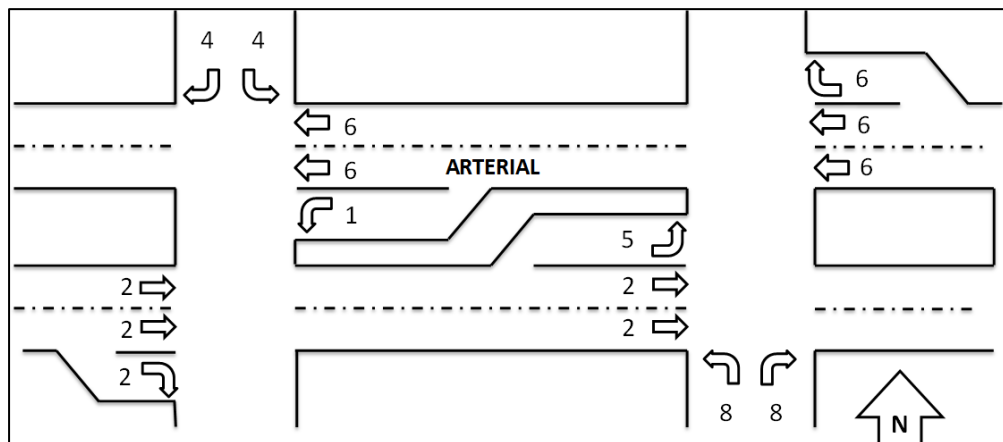
Cuando las rampas de la intersección están extensamente espaciadas, es decir en el orden de los 200 mts, es tradicionalmente usado el sistema de operación de tres fases.

Estas distancias de espaciamiento son solo guías aproximadas, la selección actual de los patrones de fases es también influenciada por los movimientos de giro internos, particularmente a distancias intermedias.

3.3.4. Controladores en intersecciones diamante

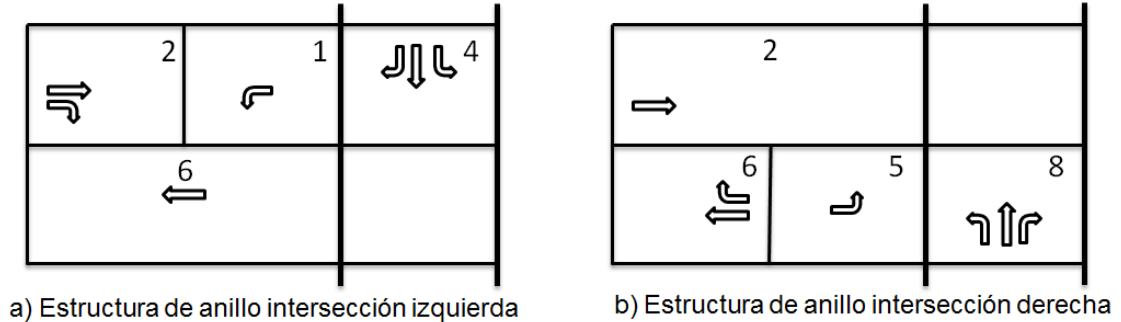
El procedimiento más común para controlar una intersección tipo diamante es empleando dos controladores, uno para cada rampa (intersección derecha e izquierda), tal y como se aprecia en la figura 25, y donde cada controlador presenta una estructura de anillos como se ve en la figura 26.

Figura 25. Intersección diamante – Estructura de controladores separados



Fuente: (Bullock 2000)

Figura 26. Estructura de controladores en anillos



Fuente: (Bullock 2000)

Si no se emplea un coordinador entre las dos intersecciones estas trabajan de forma independiente, generando ineficiencia en el caso de haber un volumen importante de tráfico en la arteria. Para evitar tal ineficiencia se recurre a un coordinador de fondo que permita un nivel razonable de progresión del tráfico a través de la intersección tipo diamante. Con esta coordinación se busca que haya dos fases en simultaneo (1 y 2 Y 2 y 5 o 2 y 6 y 1 y 6) y que el desplazamiento relativo entre las fases coordinadas sea cero o cercano a cero.

Este tipo de controladores funcionan bien siempre y cuando las distancias al interior de la intersección sean grandes, pero a medida que estas distancias disminuyen y los volúmenes de tráfico en los giros internos a izquierda aumentan, la eficiencia disminuye y se empiezan a presentar represamientos de tráfico en el interior de la intersección.

Si el tráfico arterial es significativo (Fases 2 y 6), esta incoordinación de operación no es muy eficiente. Consecuentemente, estos dos controladores adyacentes son usualmente coordinados usando un ciclo de fondo, si este ciclo de fondo es especificado, las fases coordinadas son típicamente 1 y 6 y 2 y 5, respectivamente, sin embargo ellas pueden ser 2 y 6 y 2 y 6 si los giros izquierdos avanzados son usados. Cuando un ciclo de fondo es especificado, la separación relativa del fin de la fase coordinada es generalmente cero, o cierra a cero, para

proveer un nivel razonable de progresión en la vía de dos sentidos a través del intercambiador diamante.

Cuando las divisiones entre fases son cercanas a cero, la operación del intercambiador diamante es aproximadamente caracterizado como tres fases.

Para rampas espaciadas ampliamente con una baja a moderada intensidad de los giros izquierdos internos (fase 1 y 5) y que usan dos controladores, los cuales deben ser accionados controladamente para obtener una operación eficiente de la intersección. Sin embargo como el espaciamiento entre las intersecciones es reducida y la intensidad del giro izquierdo interior aumenta, esto puede llegar a ser un problema grave para lograr una sincronización precisa entre ambas intersecciones, de tal forma que el tráfico que entra en el intercambiador no pueda moverse a través de ambas intersecciones y sea detenido en la mitad o en las curvas de regreso.

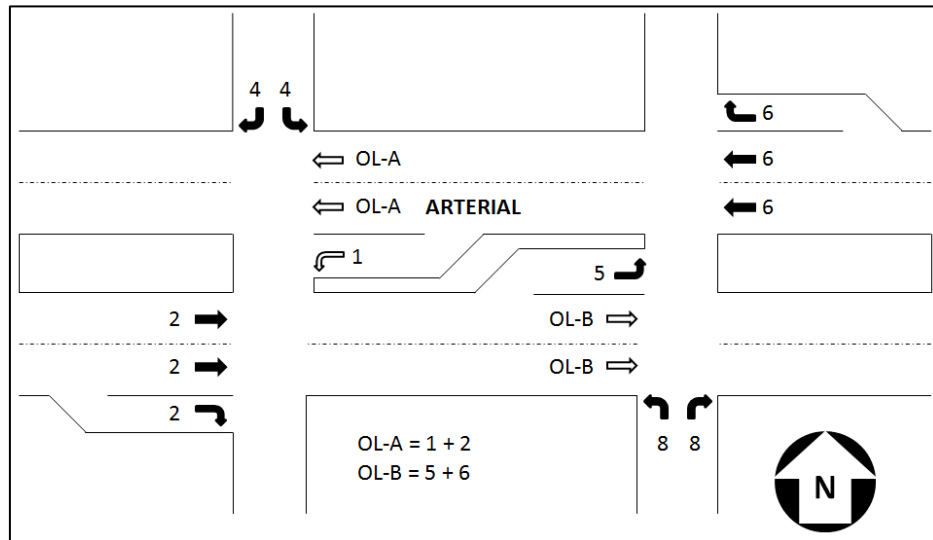
➤ *Un controlador en un operador de tres fases.*

Sobre el uso de dos controladores en una intersección tipo diamante se pueden hacer varias anotaciones, en primer lugar, mientras las fases 1 y 2 están siendo servidas también lo hace la fase 6. Si se considerara esta última fase como un Overlap se podría usar un solo anillo para controlar la intersección de la izquierda. Así mismo ocurre con la fase 2 mientras son servidas las fases 5 y 6 en la intersección de la derecha, por ende se crean dos Overlaps: A y B para las fases 6 y 2, respectivamente (figura 27).

En la estructura de anillos para un solo controlador (figura 28) la parte superior controla la intersección izquierda mientras la parte inferior controla la derecha. Se presentan cuatro alternativas, una con tres barreras, otra con dos, con una barrera y sin barreras. Cada barrera es una restricción a la progresión del tráfico a través de la intersección, donde cuatro barreras es la opción con mayor restricción y sin barreras es semejante a una intersección sin coordinación y las dos intersecciones

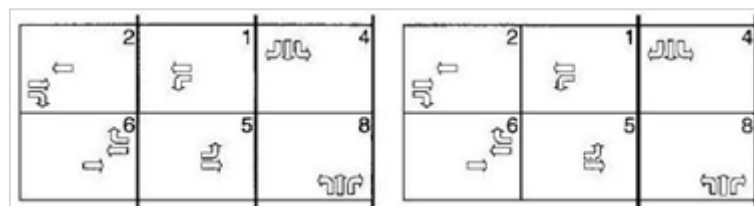
operan independientemente. El uso de dos barreras permite independencia para los movimientos frontales externos mientras que una sola barrera solo es conveniente emplearla en caso tal que los volúmenes de tráfico en las rampas sean bajos y brinden más tiempo de verde a la arteria.

Figura 27.Overlaps en el sistema de tres fases



Fuente: Capelle y Pinell (2001)

Figura 28.Secuencia sistema de tres fases



Fuente: Capelle y Pinell (2001)

Varias anotaciones hay que mencionar al respecto, primero las fases 1 y 5, alusivas a movimientos izquierdos internos, emplean un detector estándar y todas las rampas y movimientos frontales en la arteria (fases 2, 4, 6 y 8) utilizan detectores avanzados para mejorar la eficiencia reduciendo tiempos de verde excesivos. Adicionalmente cuentan con barras de parada (stop bars) que previenen que los vehículos queden atrapados entre el detector avanzado y el

stop bar, adicionalmente, permanecen activas hasta que la fila en espera es atendida.

Las ventajas de emplear un solo controlador en este tipo de intersecciones diamante es que reduce el costo que incluye el requerir de otra cabina de control del tráfico, lográndose ahorrar hasta 6000 dólares en equipos [35]. Por otro lado, con un controlador la intersección gana dinamismo ya que la coordinación de las señales se hace según la demanda y no por ciclos fijos según la hora del día tal y como ocurre en el caso de emplear dos controladores.

Sin embargo, se advierte que una desventaja es que al haber un único controlador, en el caso de fallar este la intersección fallaría en su totalidad, es decir, ambos lados de la intersección (derecha e izquierda) colapsarían.

➤ *Un controlador en un operador de cuatro fases.*

Como el volumen del giro izquierdo interior aumenta y el espaciamiento entre las rampas decrece, el almacenamiento para los giros izquierdos llega a ser una preocupación. Para hacer frente a este almacenamiento limitado, una operación de cuatro fases es usualmente utilizada.

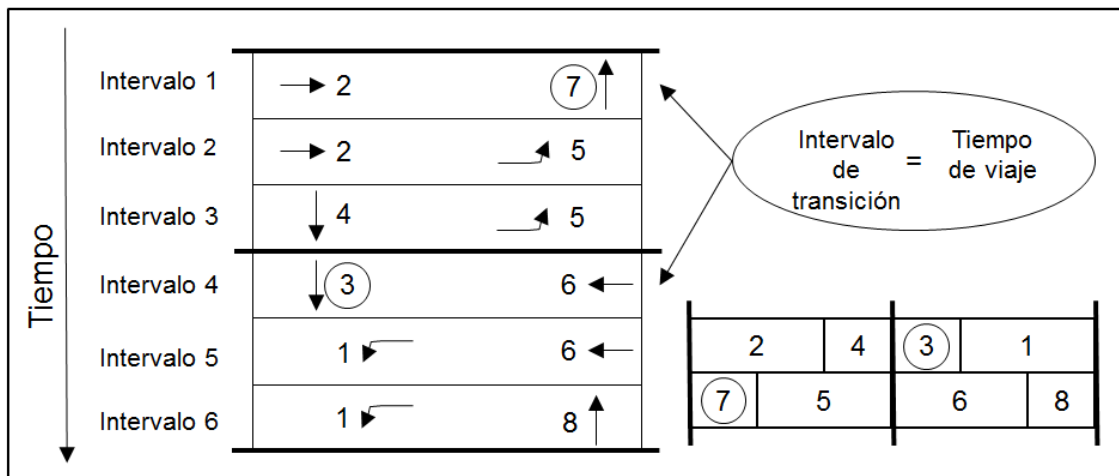
Como ya se mencionó el operador de cuatro fases se emplea cuando es de interés resolver los problemas de almacenamiento de tráfico en los giros internos hacia la izquierda, ya sea porque el espacio entre las dos vías de un solo carril decrece o los volúmenes de tráfico en los giros internos hacia izquierda son altos. La lógica de este operador es ir sirviendo secuencialmente a los cuatro giros externos (fases 2, 4, 6 y 8 ver figura 29) con dos intervalos de verde de transición.

Al observar la estructura de anillos se puede describir cada uno de los intervalos de verde como sigue:

- Intervalo dos

En la intersección de la izquierda la fase 2 es atendida mientras que en la intersección derecha es servida la fase 5. Dado que el Overlap B es servido al mismo tiempo que la fase 5 en esta fase también se realiza el movimiento frontal sobre la artería en la intersección de la izquierda.

Figura 29. Secuencia de control sistema de cuatro fases



Fuente: (Bullock 2000)

- Intervalo tres

Se sigue sirviendo a la fase 5 y al Overlap B en la intersección derecha, sin embargo, para la intersección izquierda se atiende al tráfico proveniente de la vía en un solo sentido (Overlap C). Cabe indicar que los tiempos de las fases 3, 4 y 5 han de estar coordinados de forma tal que cuando termine la fase 3 quede suficiente tráfico represado en el Overlap C para que la duración del intervalo 4 sea suficiente para que todo este tráfico represado en el Overlap C alcance a ser despachado mientras el tráfico proveniente de la intersección derecha atraviese todo el interior de la intersección, fase 6, justo antes de iniciar el intervalo cinco. Esta coordinación se logra gracias a los dos detectores que se instalan en el Overlap C y con este método se incrementa la eficiencia del operador ya que se

da un pequeño intervalo de transferencia sirviendo por corto tiempo a dos movimientos que parecieran entrar en conflicto como lo son el Overlap C y la fase 6.

- Intervalo cinco

En la intersección derecha se sigue atendiendo la fase 6 tal y como se hizo en el intervalo cuatro, mientras que en la intersección izquierda se sirven al tiempo al Overlap A y al giro interno hacia la izquierda, fase 1.

Los intervalos restantes, seis y uno, son análogos al tercer y cuarto intervalo; con la anterior descripción queda clara la importancia de un solo controlador para la intersección tipo diamante, ya que de esta forma se pueden controlar los detectores en las dos intersecciones (derecha e izquierda) al tiempo y permitir intervalos de transición como lo son el uno y el cuatro, los cuales no se podrían llevar a cabo con igual precisión y dinamismo en el caso de usar dos controladores.

➤ *Asignación de bahías de carga.*

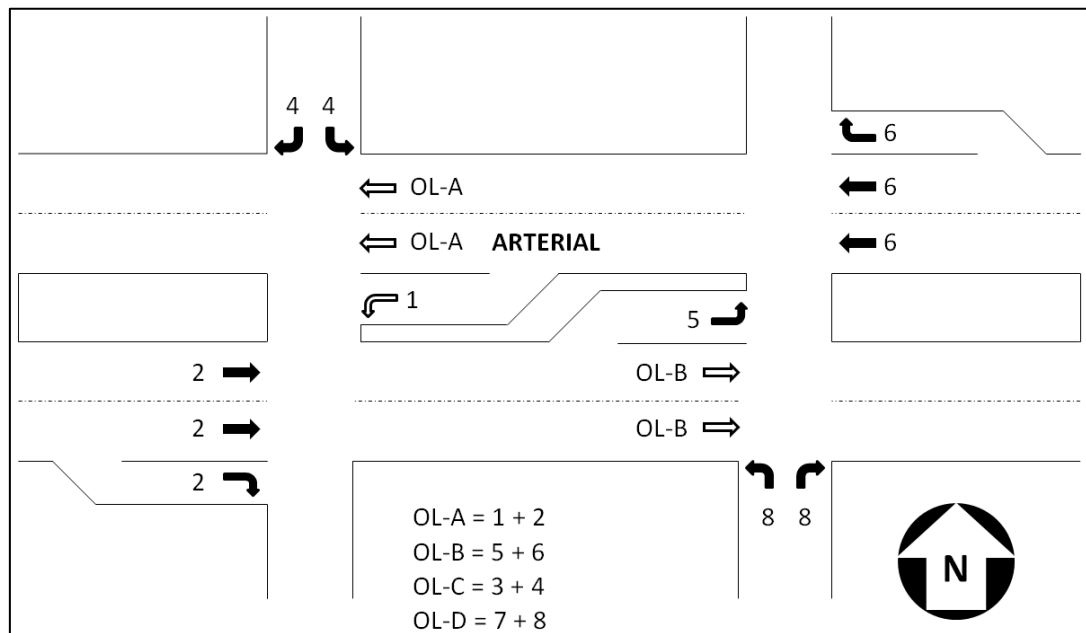
Los Overlaps C y D son necesarios para un operador de cuatro fases, sin embargo, para un operador de tres fases es necesario eliminar estos Overlaps para sostener las tres fases, por ende, se sugiere asignar a cada uno una bahía de carga, en la figura 30 se muestra que para el Overlap C se asigna la bahía de carga 4 y para el Overlap D la bahía de carga 8.

➤ *Indicaciones para peatones.*

Las indicaciones para peatones deben configurarse como se ilustra en la figura 31. Para un peatón que desee cruzar las dos vías en un solo sentido (P_2 y P_6) mientras se sirve el tráfico vehicular en la arteria no debe tener problemas dadas las cortas distancias en esa dirección, sin embargo, el peatón tendrá problemas

cuando desee cruzar la artería (P4_ y P_8). Por ello se plantea la posibilidad de dar paso a los peatones mediante Overlaps que habiliten el cruce del peatón durante dos fases. Así para alguien que desee hacer el paso P_4 tendrá las fases peatonales 4 y 5, mientras que alguien que desee hacer el paso P_8 tendrá las fases peatonales 7 y 8.

Figura 30. Bahías de carga

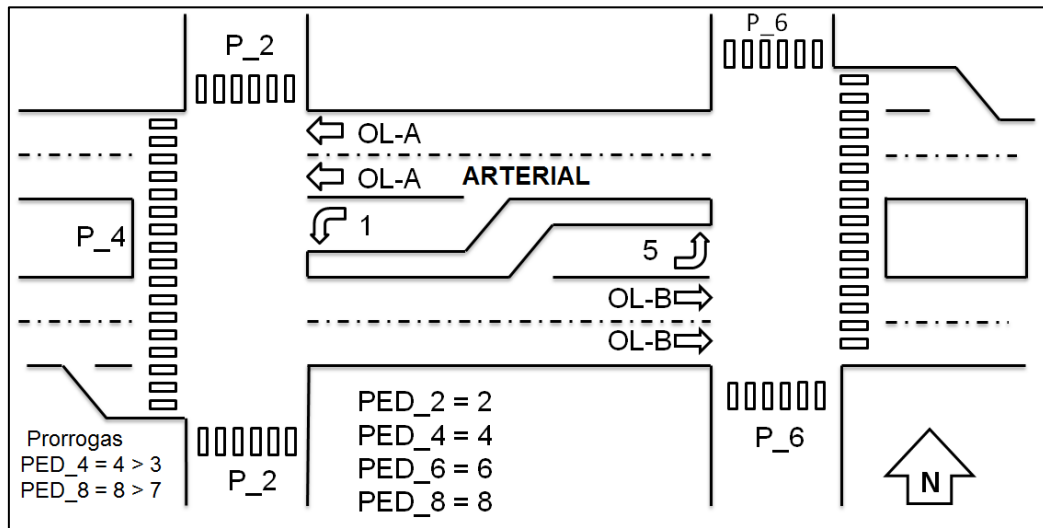


Fuente: Capelle y Pinell (2001)

➤ Operando tanto tres como cuatro fases por un controlador.

En ciertas ocasiones es deseable trabajar con un operador de tres fases y en otras con un operador de cuatro fases, dependiendo de los volúmenes de tráfico presentes en los giros izquierdos internos. Por ejemplo, se puede recurrir a un operador de cuatro fases en horas pico y a un operador de tres fases en horas no pico. Para trabajar ambos operadores bajo un solo controlador se deben montar los seis intervalos del operador de tres fases y los ocho intervalos del operador de cuatro fases, para un total de catorce fases que deben ser controladas y que se programan para ser ejecutadas en ciertas horas del día.

Figura 31. Indicaciones para peatones



Fuente: Capelle y Pinell (2001)

➤ *Selección del número de controladores.*

El principal problema a resolver es el número de controladores que se requieren para operar en la intersección diamante. Un solo controlador es en general suficiente y tiene la operación superior en comparación a dos controladores.

Dos controladores son requeridos cuando existe más tiempo de separación entre las intersecciones.

Existe un rango que determina el número de controladores en función de la separación de las intersecciones.

- Espaciamiento intersección ≤ 800 ft (Aproximadamente 244 mts) un controlador [36].
- Espaciamiento intersección > 800 ft (Aproximadamente 244 mts) dos controladores [36].

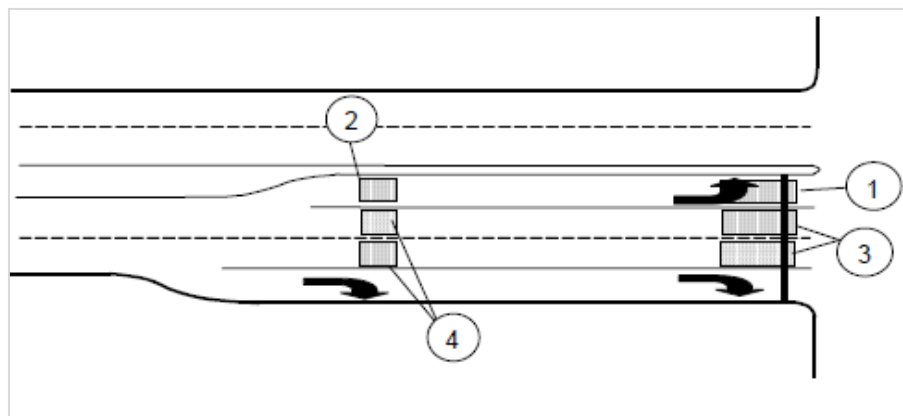
Entre las principales razones por las que se hace necesario utilizar dos controladores, son principalmente de tipo tecnológico, primero el alto costo de llevar todos los cables para los detectores y la señal a un solo lugar en el caso de un solo controlador, la caída de tensión en la señal debido a la gran longitud del cable, y las deficiencias del técnico para ver las indicaciones de la señal y el tráfico en la intersección.

➤ *Detectores.*

Su configuración y uso depende del tipo de intersección diamante que se pretenda utilizar, de su operación y del tipo de señalización.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de dichos detectores:

Figura 32. Localización de detectores



Fuente: Sharma (2005)

Existen unas condiciones para la ubicación de estos detectores las cuales dependen de la velocidad de aproximación y del espaciamiento promedio de las intersecciones, en la siguiente tabla se muestran dichas condiciones:

Tabla 9. Condiciones para la ubicación de detectores

Velocidad de aproximación	Ubicación regular de detector (mts)	Operación con varios espaciamientos de intersección (mts)					
		45 mts	60 mts	75 mts	90 mts	105 mts	120 mts
30 mph	54	161	175	195	215	229	242
35 mph	63	188	204	227	251	267	267
40 mph	72	215	233	260	287	287	287
45 mph	81	242	262	292	302	302	302

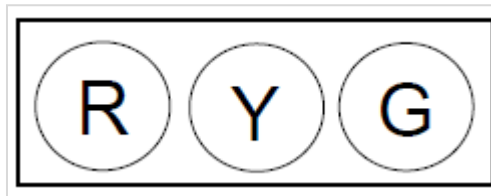
Fuente: Sharma (2005)

3.3.5. Señalización

Un diseño integral de la señalización de una intersección diamante es esencial para su buen funcionamiento [37]. El proceso de diseño debe considerar los escenarios probables de funcionamiento que enfrentará en el futuro. El diseño de las señales, también debe considerar las necesidades de los técnicos encargados del mantenimiento.

En este tipo de intersecciones sobresale el tipo de señalización elevada con mástiles horizontales donde cuelgan cada uno de los controladores e indicadores para permitir o restringir el flujo según la fase semafórica correspondiente.

Figura 33. Señalización de mástil horizontal

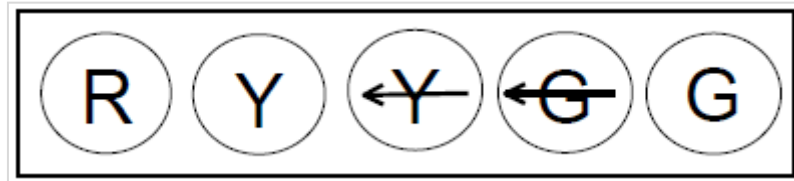


Fuente: Sunkari y Urbanik, 2000

En general, este tipo de señal debe ser instalada en los brazos del mástil montado horizontalmente, las cabezas de la señal deben tener lentes de 12-pulgadas (30,5 cm), se recomienda utilizar siempre una cabeza en cinco secciones para la

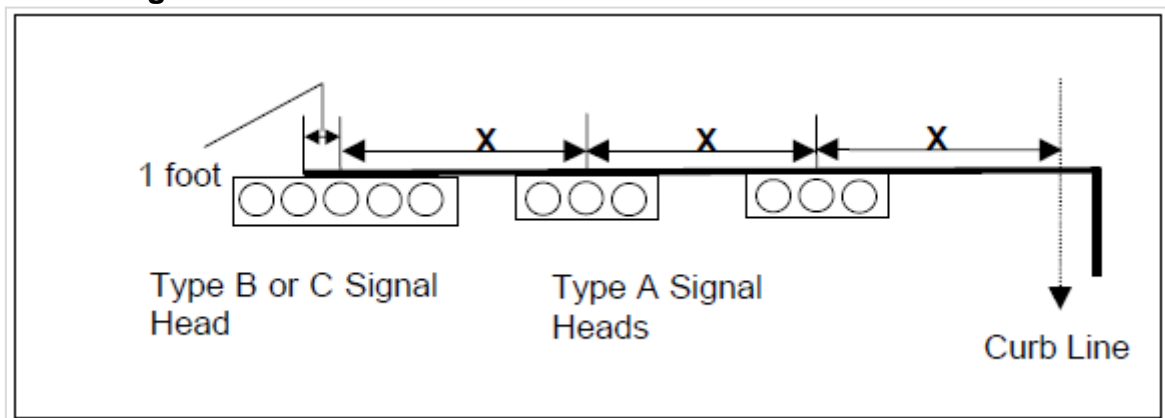
circulación interna izquierda cuando existe un único giro a la izquierda con un único carril diferenciado para dicho giro, esto permite una mayor flexibilidad en la eliminación en una etapa posterior.

Figura 34. Señalización de mástil horizontal de 5 secciones



Fuente: Sunkari y Urbanik, 2000

Figura 35. Mástil de señalización horizontal intersección diamante



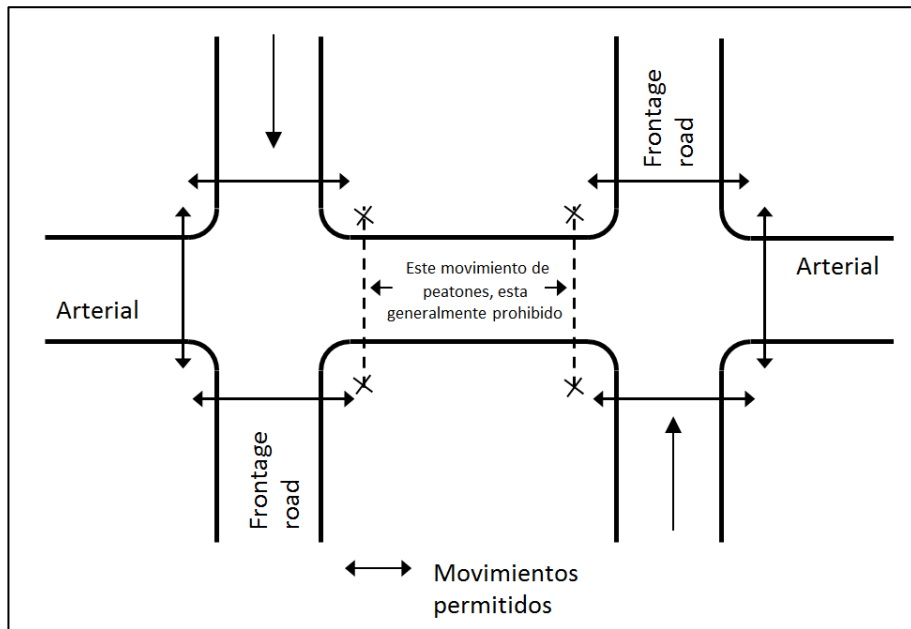
Fuente: Sunkari y Urbanik, 2000

Las cabezas de la señal deben estar uniformemente espaciadas a lo largo del mástil del brazo desde la línea de acera y no necesariamente centrado sobre los carriles o líneas de carril. La longitud del brazo del mástil dependerá en el número de señales a ser instaladas, del ancho de los carriles y la topografía del sitio.

Existe un sistema que permite el manejo o el control por parte de los peatones para este tipo de intersecciones, dichos mecanismos son botones. Los cuales son pulsadores que se encuentran siempre en todas las direcciones en que es factible para cruzar a los peatones.

Si los movimientos peatonales deben estar prohibidos, esta deberá ser simbolizada y fijada con información que diga "No cruce de peatones". En las intersecciones diamante señalizadas, los pasos de peatones son típicamente prohibidos desde el interior del diamante, como se muestra en la figura 36:

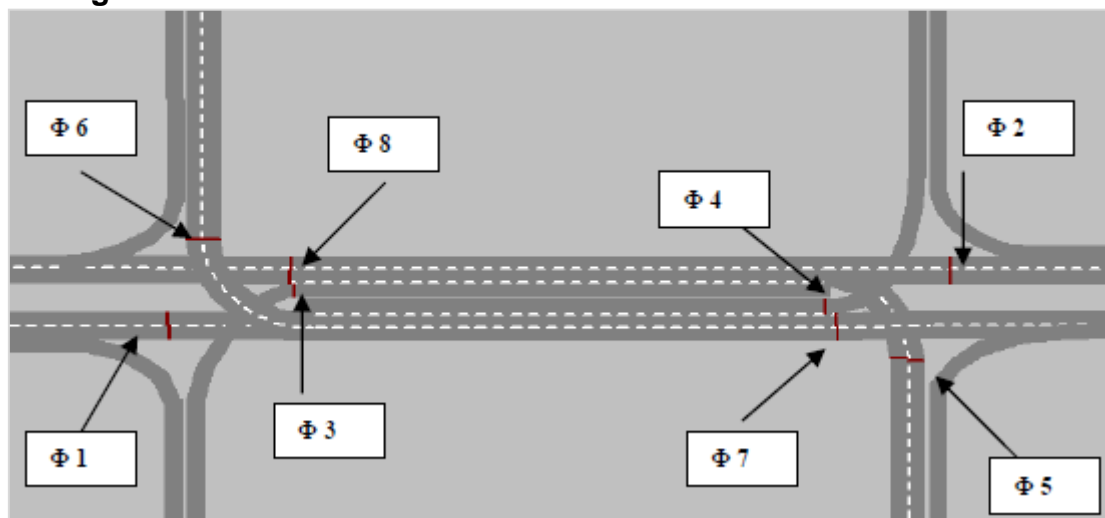
Figura 36. Movimientos de peatones en intersecciones diamante



Fuente: Capelle y Pinell (2001)

En lo relacionado con los tiempos que controlan los ciclos semafóricos en este tipo de intersección existe un estándar mínimo que guía la operación, pero que no son tiempos fijos ya que estos dependen del volumen de tráfico y de las condiciones particulares de la intersección.

Figura 37. Codificación fases semafóricas en intersecciones diamante



Fuente: Bared (2008)

Tabla 10. Tiempos fases semafóricas intersección diamante

Fase (ϕ)	Tiempo verde en segundos (Longitud de ciclo = 130 seg)
1	18 a 65
2	17 a 64
3	71 a 95
4	70 a 119
5	124 a 12
6	101 a 10
7	18 a 102
8	18 a 87

Fuente: Bared (2008)

Las señales sobre las intersecciones deberán tener las siguientes funciones:

- Estas deberán suministrar la información necesaria de la entrada de la intersección

- Estas deberán dirigir bien a los conductores dentro de los carriles apropiados para los movimientos de división o unión del tráfico
- Estas deberán identificar las rutas y direcciones sobre estas rutas
- Estas deberán mostrar las distancias a los destinos
- Estas deberán proveer de otra información de importancia para el conductor

El tamaño e inscripción de las señales de la intersección deberán corresponder al tipo de carretera sobre la cual este situada la intersección. Cualquiera sea el caso, las letras, números, símbolos y bordes deberán ser refractivos para una mejor visualización.

El plan de señalización que mostrara el tipo y localización de las diferentes señales deberá ser preparado simultáneamente con el diseño de la intersección.

A medida que se han venido implementando estas soluciones, han ido apareciendo inconvenientes que cada vez tienen que ser resueltos, entre ellos la confusión que puede provocar sobre el usuario de la vía el hecho de sentir que va manejando en el sentido contrario, esto se ha ido mitigado con el uso de la señalización anteriormente mencionada y además con la implementación de pintura sobre pavimento, que indica el sentido de circulación.

3.3.6. Intersecciones tipo divergente diamante

Como se mencionó en capítulos anteriores existe una versión mejorada de la intersección diamante, la cuál es la intersección tipo diamante divergente (diverging diamond interchange),

Figura 38. Intersección tipo divergente diamante, Versailles - Francia



Fuente: Golbexplorer

La geometría de la intersección tipo diamante divergente no varía mucho con respecto a la de su antecesora, las rampas de acceso, el número de carriles, etc. Se diseñan de la misma manera que la intersección tipo diamante convencional, el único cambio importante en su geometría es la configuración de las mini-intersecciones, ya que pasan de ser intersecciones comunes tipo T entre dos vías, a ser un entrecruzamiento de los carriles de una misma vía y unas convergencias y divergencias de carriles entre las rampas de acceso y la vía arteria.

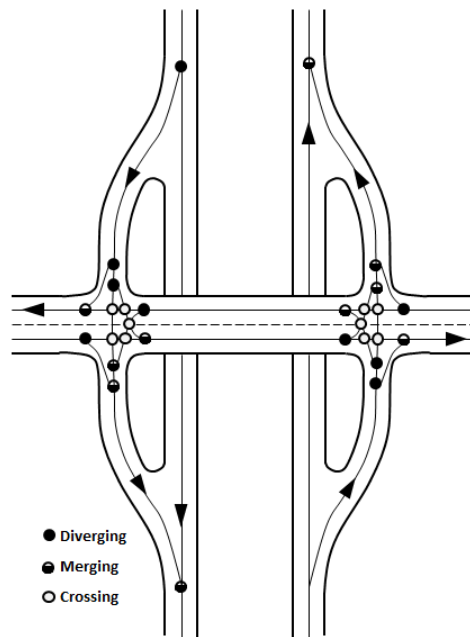
Una intersección diamante convencional tiene un total de 26 puntos de conflicto, en las vías de llegada o rampas terminales, de los cuales 10 son puntos de conflicto de cruce. En la DDI como los giros son aislados, el número total de conflictos se reduce a 14, sobresaliendo que los puntos de conflicto por cruce son reducidos a 2 [82].

Tabla 11. Comparación de puntos de conflicto entre una intersección diamante convencional y una divergente

Puntos de conflicto		
Type	Diamante convencional	Divergente diamante
Divergente	8	6
Fusión	8	6
Cruce	10	2
Total	23	14

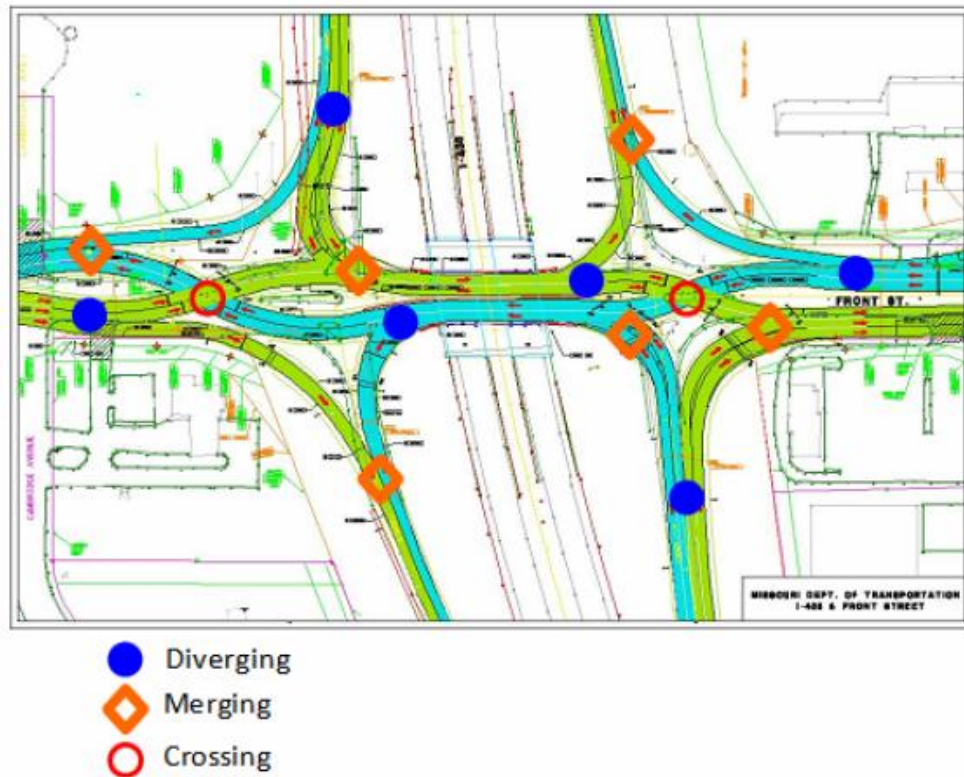
Fuente: Siromaskul (2007)

Figura 39. Puntos de conflicto intersección diamante convencional



Fuente: Siromaskul (2007)

Figura 40. Puntos de conflicto en una intersección divergente diamante



Fuente: Siromaskul (2007)

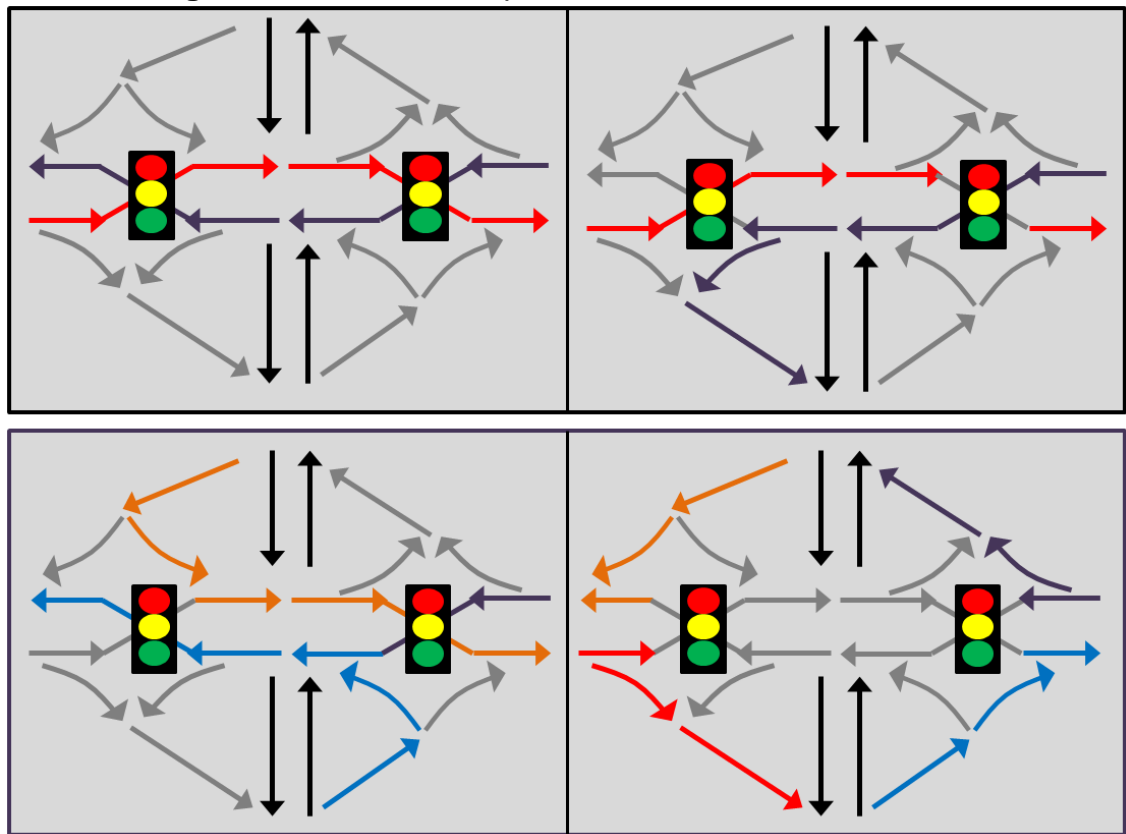
El cambio más importante entre estas intersecciones se da en su sistema de operación, mientras que la intersección tipo diamante convencional tiene tres tipos, la diamante divergente solo tiene uno, esto debido al entrecruzamiento de los carriles en la vía arteria, además es un sistema de operación de dos fases.

➤ *Sistema de operación de dos fases*

Debido a que en esta intersección los giros izquierdos no presentan problemas de entrecruzamiento con tráfico opuesto, el sistema de operación se simplifico a uno de dos fases. El entrecruce más importante se da entre los carriles de la vía arteria los cuales cambian de sentido dentro de la intersección.

A continuación se presentan todos los posibles movimientos dentro de la intersección.

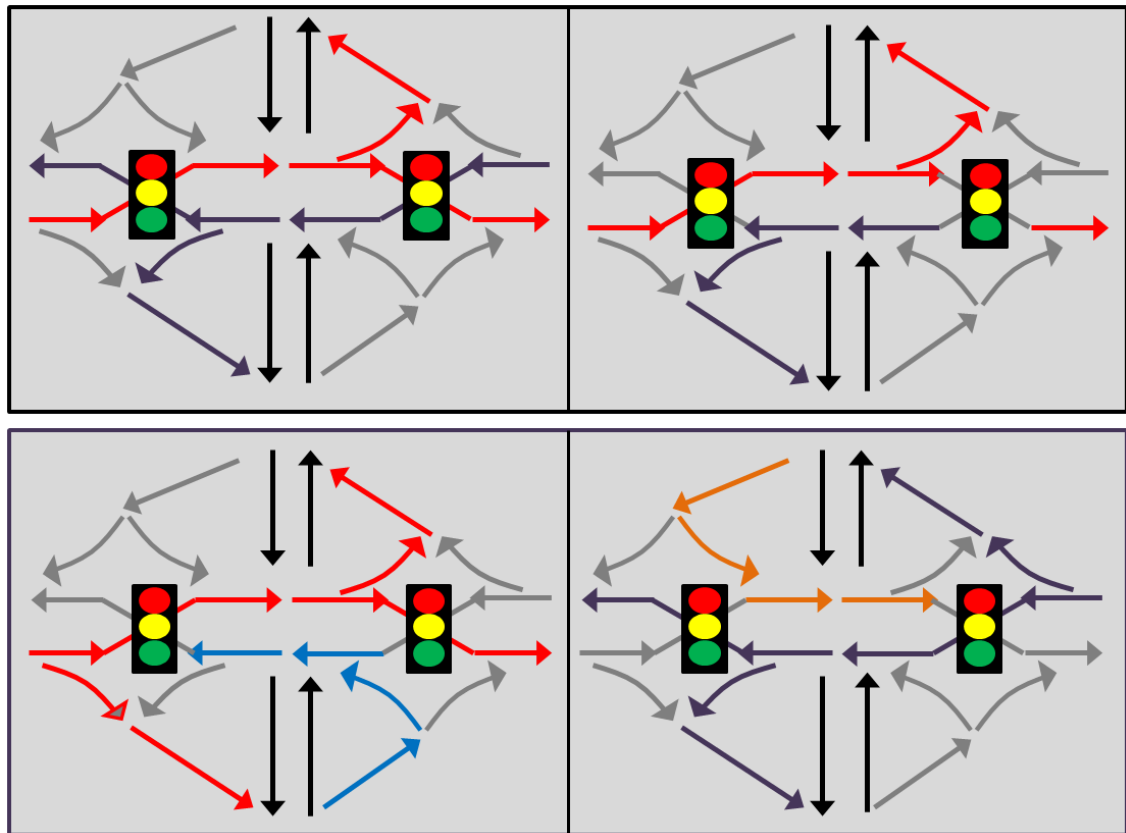
Figura 41. Movimientos posibles dentro de la intersección



Fuente: Chlewicki (2003)

El sistema de operación de dos fases es muy simple, mientras que el giro izquierdo de una de las rampas de acceso es atendido, también son atendidos todos los movimientos en la dirección contraria a esta y después se repite la fase con la otra rampa. Los giros derechos de la intersección son controlados con marcas de pavimento y señalización de ceda el paso, si el volumen de tráfico es muy pesado se recurre a los semáforos. Los semáforos se utilizan en el entrecruzamiento de los carriles de la vía arteria y cuando se necesite en el giro izquierdo de la rampa de acceso.

Figura 42. Sistema de operación de dos fases



Fuente: Chlewicki (2003)

3.3.7. Variaciones de las intersecciones

El diseño de la intersección diamante normal ha sido modificada en diversas formas, ya sea para aumentar la capacidad o el rendimiento del flujo.

La mayor parte de estas variaciones incluye la reorientación de algunos movimientos a la izquierda o de otros movimientos que fluyen en sentido contrario.

Las exigencias del diseño se complican si las rampas también llevan el tráfico en carreteras adyacentes, o está conectado a recuperarse en rampas de intercambio. No hay ninguna diferencia entre los movimientos extra por caminos laterales y los movimientos extra para un intercambio de rebote.

En la tabla 12 se presentan una comparación entre diferentes propuestas de modificación que se han implementado.

T XS: Lugares donde los movimientos a través de la calle se cruzan entre sí.

TE: Lugares en los giros a la izquierda a la entrada en pista donde se cruzan entre sí.

T Ex: Lugares en los giros a la izquierda de la rampa de salida donde se cruzan entre sí

Penalizaciones: En fase de períodos extra, para agregar carreteras adyacentes.

A continuación se explican algunas de las variaciones presentadas en la tabla.

- Diamante Estándar
 - a) La distancia entre las intersecciones limita el almacenamiento de los giros izquierdos cuando la señal de tres fases es usada.
 - b) La señal de seis fases remueve el límite de almacenamiento
 - c) El puente necesita carriles in ambas direcciones, más los carriles izquierdos de almacenamiento

- Diamante estándar, con caminos laterales
 - a) La distancias entre las intersecciones limita el almacenamiento de los giros izquierdos cuando la señal de tres fases es usada
 - b) La señal de seis fases remueve el límite de almacenamiento
 - c) El puente necesita carriles in ambas direcciones, más los carriles izquierdos de almacenamiento
 - d) Los caminos laterales adicionales no tienen fases extras, pero la capacidad para los giros izquierdos es limitado
 - e) Esta intersección es la más utilizada para conectar las intersecciones de retorno

Tabla 12. Variaciones intersecciones diamante

Nombre	N° intersecciones	N° fases	N° divergencias	N° convergencias	N° cruces	N° entret ejidos	T X S	T E	T E x	Penalizaciones	Condiciones
1. Diamante Standard	2	3(6)	6	6	6	0	0	2	2	0	flujo limitado por almacenamiento
2. Igual, con caminos laterales	2	6(3)	10	10	10	4	0	2	2	0	flujos limitados por almacenamiento
3. Contraflujo Izquierdo	2	3	6	6	8	0	0	0	2	0	salida de flujo limitada por almacenamiento
4. Igual, con caminos laterales	2	3	10	10	10	4	0	0	2	0	salida de flujo limitada por almacenamiento
5. Giros Divergentes	6	3(5)	8	8	6	2	0	0	0	0	flujo no limitado
6. Igual, con caminos laterales	2(4)	4(8)	12	12	14	6	0	0	0	1	flujo no limitado
7. Diamante Divergente	2	2	6	6	2	2	2	0	0	0	50% limitado, salidas por limitadas almacenamiento

8. Igual, con caminos laterales	2	3	10	10	6	6	2	0	0	1	salida limitada por almacenamiento
9. Medio Diamante Divergente	4	3(5)	7	7	4	2	0	0	0	0	flujo no limitado
10. Igual, con caminos laterales	4	4(8)	11	11	10	6	0	0	0	1	flujo no limitado
11. Single Point Urban (SPUI)	1	3(5)	6	6	8	0	0	0	0	0	flujo no limitado, puente largo
12. Igual, con caminos laterales	1	4(8)	10	10	16	4	0	0	0	1	flujo no limitado, puente largo

Fuente: Warrick (2207)

- Contraflujo izquierdo
 - a) El almacenamiento entre las intersecciones limita la capacidad de las rampas de salida, pero no la de las rampas de entrada
 - b) Las fases del giro izquierdo de la rampa de entrada y las fases opuestas pueden ser divididas
 - c) El almacenamiento del giro izquierdo es grande para un giro izquierdo retrasado, como opuesto para un giro izquierdo de adelanto.
 - d) El puente necesita carriles en ambas direcciones, más los carriles izquierdos de almacenamiento.

- Contraflujo izquierdo, con caminos laterales
 - a) El almacenamiento entre las intersecciones limita la capacidad de las rampas de salida, pero no la de las rampas de entrada
 - b) Las fases del giro izquierdo de la rampa de entrada y las fases opuestas pueden ser divididas
 - c) El almacenamiento del giro izquierdo es grande para un para un giro izquierdo retrasado, como opuesto para un giro izquierdo de adelanto
 - d) El puente necesita carriles en ambas direcciones, más los carriles izquierdos de almacenamiento y tres divisores de tiras
 - e) Los caminos laterales adicionales no tienen fases extras, pero la capacidad para los giros izquierdos es limitada

- Giros divergentes
 - a) El flujo no está limitado por el diseño
 - b) Las fases del giro izquierdo de la rampa de entrada y las fases opuestas pueden ser divididas
 - c) El puente necesita carriles en ambas direcciones, más los carriles izquierdos de almacenamiento y tres divisores de tiras

- Giros divergentes, con caminos laterales
 - a) El flujo no está limitado por el diseño
 - b) El almacenamiento del giro izquierdo es grande para un giro izquierdo retrasado
 - c) La intersección puede ser operada como una sistema de 8 fases
 - d) El puente necesita carriles en ambas direcciones, más los carriles izquierdos de almacenamiento y tres divisores de tiras
 - e) Los caminos laterales adicionales tienen fases extras

Al realizar una comparación entre las características de operación de la intersección diamante convencional y de la intersección divergente diamante, tal como lo demuestra Edara [38], donde muestra la efectividad del funcionamiento para la intersección tipo DDI cuando los volúmenes de tráfico son altos (entre 4000 y 5000 Veh/hr) ofreciendo bajos tiempo de demora y de parada, menor número de paradas y disminuyendo la longitud de las colas, en el caso de volúmenes de tráfico bajos (Menores a 1500 Veh/hr) los dos tipos de intersecciones se comportan de manera muy similar, en la siguiente tabla se puede ver una comparación entre diferentes criterios de evaluación para cada una de estas soluciones.

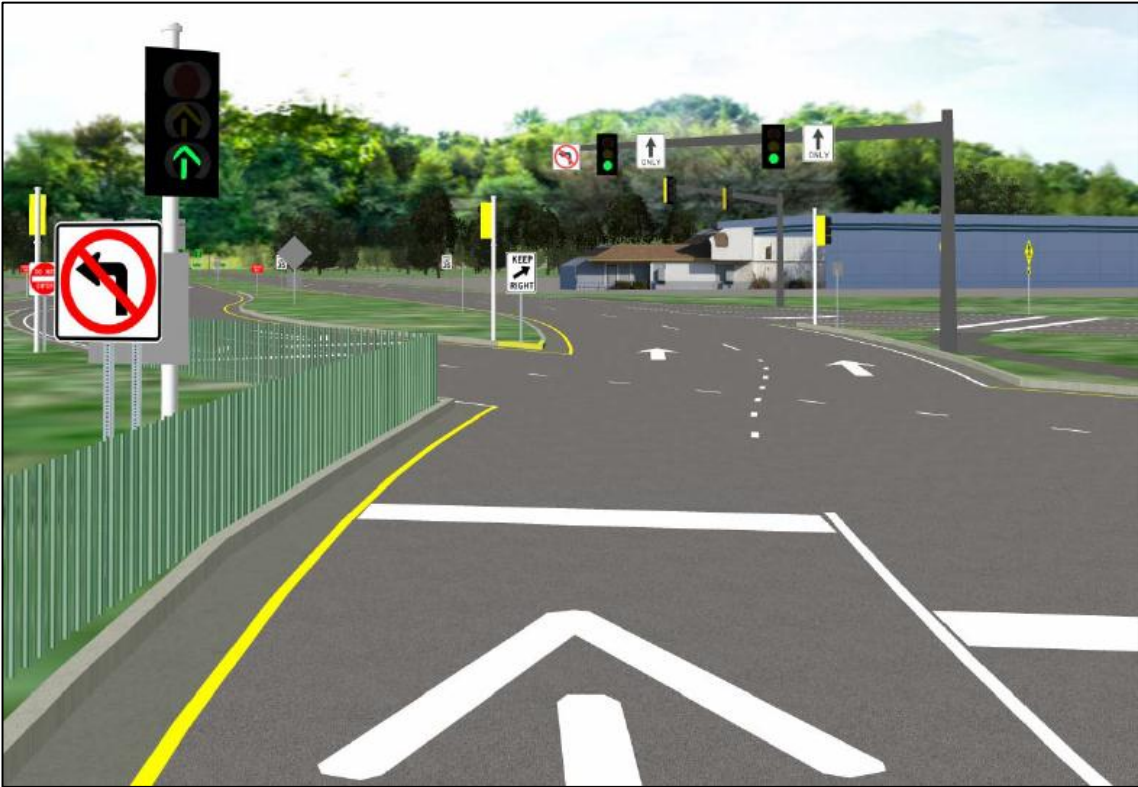
Tabla 13. Criterios de evaluación para una intersección tipo DI y DDI

CRITERIO DE EVALUACIÓN	DI	DDI
Capacidad de la Intersección	Media	Alta
Espacio Intersección Adyacente	Media	Alta
Progresión del vehículo al Cruzar la Calle	Media	Bajo
Seguridad del Tráfico	Media	Media
Peatones/Acomodo de Bicicletas	Alto	Media
Costos de Construcción	Medio	Bajo/Alto
Costo de Derecho de Vía	Bajo	Bajos/Medio

Fuente: Edara (2003)

Al revisar una proyección de flujos para el 2030 realizado por la FWHA en la simulación de una intersección diamante convencional y una intersección diamante divergente en la autopista I-5 en Oregón, se obtuvieron los siguientes resultados que permitieron medir el impacto que generan ambas soluciones.

Figura 43. Simulación intersección diamante divergente realizada por la FWHA



Fuente: FWHA (2007)

Figura 44. Simulación intersección diamante convencional realizada por la FWHA



Fuente: FWHA (2007)

Tabla 14. Comparación del funcionamiento intersección tipo DI y DDI

Tema	Intersección diamante convencional	Intersección diamante divergente
% Utilización de la capacidad de la intersección	65,2%	39,7%
Demora promedio por vehículo (seg)	21,1	5
Numero de señales	2	2
Número de fases	4 Fases	2 Fases
Vía de aproximación (Ancho) (Este)	6 Carriles	4 Carriles
Vía de aproximación (Ancho) (Oeste)	5 Carriles	2 Carriles

Fuente: Siromaskul (2007)

3.3.8. Beneficios e inconvenientes

El mayor beneficio de la DI y la DDI es la habilidad de combinar fases en condiciones que no pueden darse en otros diseños de intersecciones e intercambiadores. Las fases de rampa pueden ser combinadas con movimientos a través de la línea principal, y los movimientos izquierdos de la línea principal pueden ser combinados a través de movimientos a lo largo de toda la fase sin una mayor penalidad a otras fases. La coordinación de las señales puede ser hecha entre una fase de rampa y una fase de cruce sin mucha dificultad debido a la geometría única de este diseño. La reducción de una fase cuando es comparada con un intercambiador diamante de tres fases puede también beneficiar el tiempo de las señales.

La DDI tiene menos puntos de conflictos que una intersección diamante convencional debido a la habilidad para hacer giros izquierdos sin cruzar sobre al camino, sin embargo puede causar confusión a los conductores y causar problemas de seguridad, situación que ha buscado ser mitigada con el uso de una señalización adecuada, especialmente la implementación de pintura de diferente color sobre el pavimento, para indicar el sentido de circulación al usuario de la vía. Otra ventaja de la DDI sobre la intersección diamante convencional y la intersección urbana diamante es la habilidad para combinar los carriles (por ejemplo los carriles que permiten el giro izquierdo y los movimientos a través) de los caminos este y oeste sin cambiar la fase de las señales, esto es una característica común en la intersección SSP.

Teóricamente este diseño se puede realizar muy eficientemente cuando los movimientos más cargados son giros izquierdos o derechos o al de las rampas. En otras palabras si existiera un punto muy popular y atractor de muchos viajes en el oeste y muy pocos viajes fueran al este, la señal del cruce oeste podría ser altamente usada y la señal del este no.

Cuando la cantidad de vehículos tanto de las rampas de acceso como de los que van a través de la línea principal son similares, este diseño puede llegar a ser inferior en comparación con otro diseño de intercambiador tipo diamante. Esto es debido a que la coordinación entre las dos señales puede llegar a ser más difícil cuando no se ajusta al diseño geométrico de un intercambiador divergente diamante. Este diseño puede no ser capaz de coordinar todos los movimientos efectivamente si ellos están igual de cargados.

La confusión que puede generar en los conductores es otra preocupación para el diseño, sin embargo dicha confusión puede ser reducida con un buen diseño geométrico, señalización apropiada y marcas en el camino como se menciono anteriormente

La preocupación final tiene que ver con los accesos de conductores a edificios o residentes cerca al intercambiador, esto no es un gran problema en la DI, como si lo puede llegar a ser para la DDI porque el acceso generalmente no es permitido entre rampas terminales y el camino vuelve a las características convencionales inmediatamente después el conductor pasa la intersección.

En el proceso de desarrollo de la DDI en Kansas City, la FHWA desarrolló un modelo tridimensional donde instalo simuladores de conducción para probar distintas aplicaciones, como fueron creación de bandas, colocación de señales, para mitigar las preocupaciones sobre la confusión del conductor.

Desde la perspectiva de un diseñador, la intención es hacer que el conductor se sienta

como si estuvieran en una calle de una sola intersección de otra calle de sentido único. Hecho correctamente, el conductor no debe sentirse como si estuvieran en el "lado derecho" o el "lado equivocado" de la nada.

4. MODELOS DE OPERACIÓN DE INTERSECCIONES DIAMANTE

Como el número de vehículos y las necesidades de transporte crecen, las ciudades del mundo muestran serios problemas de congestión de tráfico en sus carreteras. Los costos incluyen pérdida de tiempo (ya sea tiempo libre o de trabajo), aumento del consumo de combustible, contaminación, problemas de salud, stress y malestar, en general. Además, la congestión retarda el movimiento de mercancías y de servicios, de modo que aumenta el precio de los productos y reduce la competitividad de los negocios. Hay diferentes métodos para abordar el problema de control de semáforos, es decir frecuencia variable en el cambio de luces para proporcionar una circulación suave y evitar largas colas en unas calles y circulación escasa en otras.

Este es el tema de este capítulo, y basados en la información expuesta en el capítulo anterior, sobre la operación y funcionamiento de las intersecciones tipo diamante y diamante divergente, se puede afirmar que unos de los parámetros más característicos y que influyen de manera significativa sobre su comportamiento es el sistema de semaforización, llegando al punto de ser fundamental en la selección de otros parámetros como son anchos de carril, velocidades de operación, capacidad y niveles de servicio.

Ya desde Huijberts - Schuppen [39], aparecen métodos que estudian el problema de control de semáforos mediante modelos matemáticos, aunque dicha cuestión también se trata mediante técnicas de simulación [40].

4.1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN INTERSECCIONES DIAMANTE

Para poder entender cada uno de los modelos existentes para la operación semafórica en las intersecciones diamante es necesario conocer los principales parámetros que influyen en su funcionamiento:

- *Capacidad:* Es el número máximo de vehículos que pueden pasar en un sentido por una determinada sección de la vía en la unidad de tiempo y en condiciones ideales como: flujo continuo, terreno plano, usuarios regulares. Para este tipo de intersecciones la capacidad se expresa en vehículos livianos por hora verde y se efectúa en el espacio físico de la intersección por ser estas las de más capacidad. Capacidad máxima para este tipo de flujo es de 1900 vehículos livianos / hora / carril.

Los factores que afectan la capacidad son: la composición y la variación del flujo del tránsito.

- *Flujo de saturación:* De acuerdo con los referentes teóricos, el flujo de saturación se define como “el máximo volumen de tránsito que pudiera entrar en una intersección semaforizada, por un acceso, carril o carriles del mismo, si el semáforo exhibiese siempre su indicación verde y a partir de la determinación de este valor, es posible determinar la capacidad de que dispone un carril o grupo de carriles de acuerdo con el tiempo efectivo dispuesto para el cruce.

A nivel local el procedimiento de mayor aplicación para obtener los valores de saturación bajo condiciones prevaletientes de la infraestructura vial, del tránsito y del subsistema de regulación del tránsito, se fundamenta en la metodología recomendada en el Highway Capacity Manual (HCM).

El flujo de saturación se suele expresar en vehículos (por acceso, carril o carriles) por hora de verde. De acuerdo con lo establecido en el HCM, se considera que un vehículo entra en una intersección cuando su eje trasero (que es prácticamente su extremo trasero) cruza por la línea de pare del acceso.

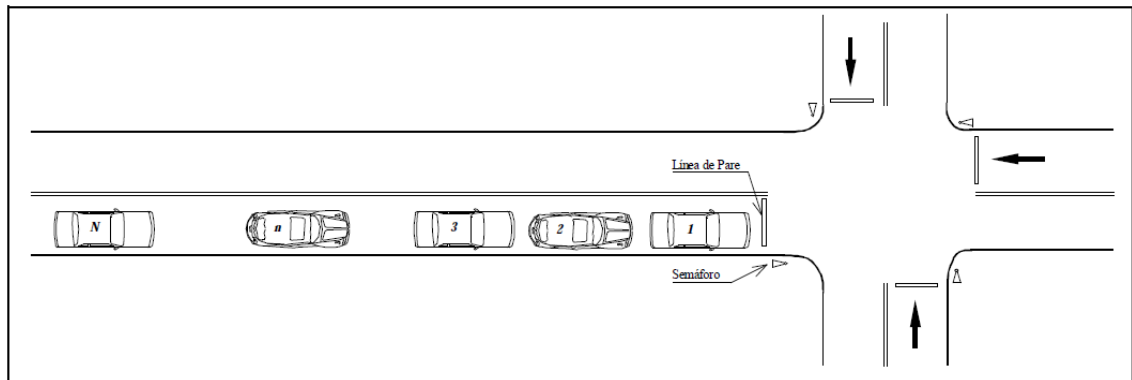
Se define Intensidad de saturación “S” al inverso del flujo de saturación expresado en segundos, el cual se acostumbra a medir en un solo carril, y

representa aquella intensidad por carril en la que los vehículos pueden pasar a través de la intersección semaforizada en una sola cola. Este intervalo es el tiempo que media entre los pasos de la parte o eje trasero de dos vehículos consecutivos por la línea de pare.

Al existir la cola de vehículos en un carril de un acceso a una intersección semaforizada, como la ilustrada en la figura 45 y una vez iniciada la fase de verde, el vehículo N° 1 arranca y entra en la intersección, el tiempo que demora esta operación, por efecto de la acción – reacción del conductor detenido, se define como el paso de entrada. Poco más de un segundo después arranca el vehículo N° 2 y también entra en la intersección, el tiempo existente entre el paso del eje trasero del primer vehículo por la línea de pare y el ingreso del segundo vehículo a la intersección se define como entrada del vehículo; de manera similar se establece para el resto de vehículos de la cola.

- *Velocidad de flujo:* es un parámetro que debe ser analizado para la determinación del nivel de operación del tránsito vehicular y la detección de puntos críticos de congestión. Esta depende de la intensidad del tránsito, de la naturaleza del terreno y de la jerarquía de la vía.
- *Flujo del tránsito:* La cantidad, el sentido y la composición de los vehículos.

Figura 45. Condiciones del flujo interrumpido en la circulación de un carril de un acceso a una intersección semaforizada



Fuente: Manual de Planeación y Diseño de Tránsito y transporte, Pág. 3-56
Tomo I, 1998

4.2. FUNDAMENTOS DE MODELOS DE OPERACIÓN

Como se ha venido mencionando a lo largo de esta investigación, la operación característica de este tipo de intersecciones es lo que las hace un tanto particular a las intersecciones normalmente implementadas en las ciudades colombianas.

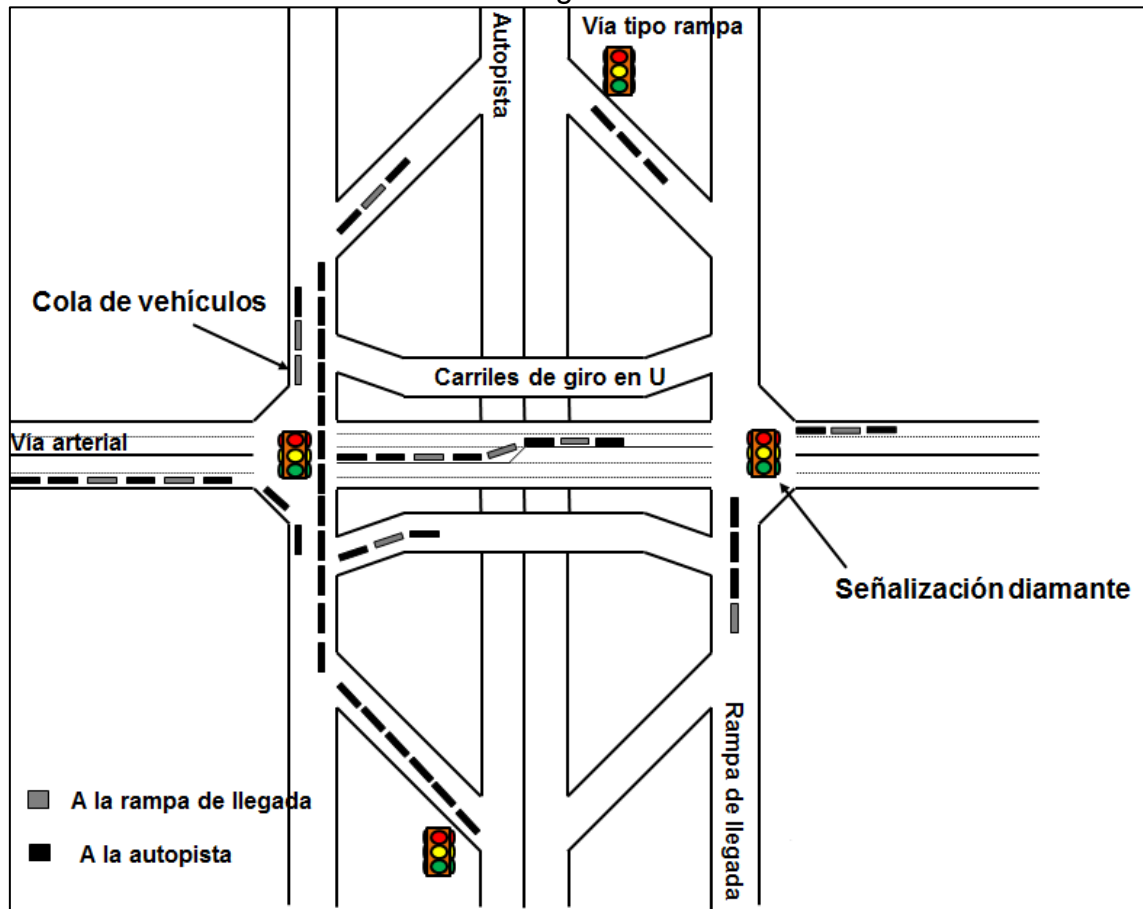
A continuación se hace un recorrido por los modelos de operación semaforizada más usados en el funcionamiento de este tipo de intersecciones.

4.2.1. IDIRMS (Sistema integrado de intercambiador diamante y rampa)

Un problema operacional que se ha presentado en la implementación de este tipo de intersecciones, ha sido tratar la intersección y las vías que llegan a esta como elementos independientes, en algunos casos debido a las responsabilidades jurisdiccionales donde la vía arterial superficial es administrada por la ciudad o agencias de países mientras el sistema de vías locales o vías de llegada son administradas por el departamento de transporte (para el caso de intersecciones en ciudades norteamericanas [41]). En muchos de los diseños no se consideran la interacción entre los dos elementos, ignorando los potenciales beneficios que pueden ser derivados de la coordinación de sus operaciones.

Esta falta de integración del sistema o coordinación entre los semáforos que coordinan a menudo crean mayores problemas operacionales, la situación es mostrada en la siguiente figura.

Figura 46. Esquema de sistema de una intersección diamante con rampas de llegada



Fuente: Sayed (2007)

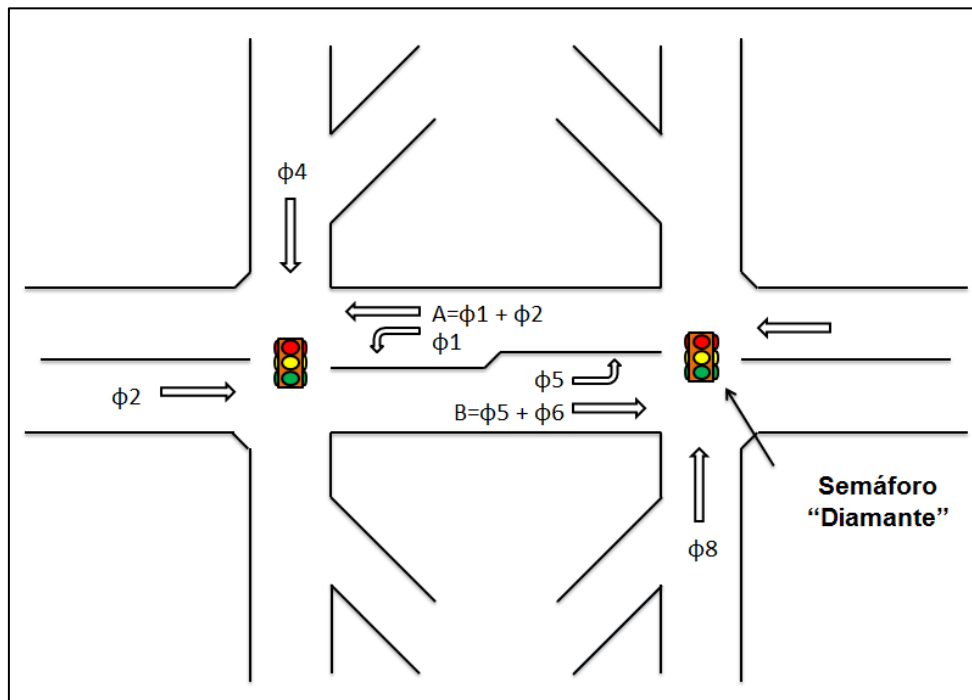
Durante las horas pico típicas, las altas demandas de tráfico en la vía arterial a menudo requieren de una entrada restringida de tráfico de la vía tipo rampa, produciendo largas colas en la rampa. Esto unido al hecho de que el tráfico liberado por el semáforo de la intersección diamante llegue aumentando la

longitud de la cola, todas estas situaciones interfieren con la operación de la vía arterial y además causan serios problemas de seguridad.

Estrategias sugeridas para controlar este fenómeno generalmente implican en anular alguna de las colas, sacrificándose generalmente la vía o rampa de llegada, de la identificación de este problema resulto el nacimiento de este modelo operacional conocido como IDIRMS por sus siglas en inglés integrated diamond interchange ramp-metering system o sistema integrado de intercambiador diamante y rampa [42].

En una intersección diamante los dos semáforos son típicamente controladas por un controlador simple. La siguiente figura muestra el diseño de una un sistema de fases diamante

Figura 47. Diseño de fases estándar intersección diamante



Fuente: Wu (2003)

La cual incluye las 8 fases estándar (excepto por Ø3 y Ø7), cada fase de señal controla un movimiento de tráfico particular, los dos movimientos a de cruces internos son controlados usando fases tipo overlaps A y B, por ejemplo, la fase de overlap A controla el movimiento de cruce interno, el cual recibe el verde cuando Ø1 o Ø2 es verde. Un DI también aplica un esquema único de fases para controlar esta operación, definiendo el cambio secuencial de las fases y su movimiento de tráfico asociado. Asociados a este modelo de operación se encuentran los esquemas de fases para intersecciones diamante como son el sistema de tres fases y el de cuatro fases, a continuación se presenta la aplicación del modelo para el cálculo de las fases adecuadas para cada uno de estos dos esquemas.

➤ *Cálculo de división de fases*

La metodología empleada por este modelo se basa en el principio de igualdad de los grados de saturación, el cual es normalmente usado para determinar las divisiones de fases en intersecciones señalizadas.

La metodología fue originalmente desarrollada por Webster y Cobbe [43], también tiene el objetivo de minimizar las demoras en intersecciones señalizadas. La metodología ha sido adoptada en procedimientos estándar tales como en el HCM 2000 y PHASER III, una descripción del método es mostrada a continuación.

Suponiendo que existen n fases con una longitud de fase Ø_i para la fase i, el tiempo disponible para asignar entre estas n fases es la longitud del ciclo, C, en segundos. Fase i tiene un tiempo de pérdida de l_i = l.

$$\sum_{i=1}^n \phi_i = \phi_1 + \phi_2 \dots \dots + \phi_n = C \quad (4.1)$$

La capacidad del movimiento m con fase i es entonces:

$$c_m = \frac{g_i}{C} S_m = \frac{\phi_i - l}{C} S_m \quad (4.2)$$

El grado de saturación para el movimiento m con fase i es:

$$x_m = \frac{V_m}{c_m} = \frac{V_m}{S_m} \frac{C}{\phi_i - l} = y_m \frac{C}{\phi_i - l} \quad (4.3)$$

$$y_m = \frac{v_m}{S_m} \quad (4.4)$$

Alcanzando un grado igual de saturación:

$$X_{CI} = x_m = y_m \frac{C}{\phi_i - l_i} \quad (4.5)$$

Allí, y_m es tomado como el movimiento crítico en la fase i , i.e., el movimiento en fase i que tiene el valor y_m más alto. De la ecuación 4.5 se tiene:

$$g_i = \phi_i - l = y_m \frac{C}{X_{CI}} \quad (4.6)$$

$$\sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n (\phi_i - l) = C - nl = \sum_{i=1}^n y_m \frac{C}{X_{CI}} = \frac{C}{X_{CI}} \sum_{i=1}^n y_m = \frac{C}{X_{CI}} Y \quad (4.7)$$

$$X_{CI} = \frac{C}{C - nl} \quad (4.8)$$

El Split verde para la fase i , g_i , puede ser determinada basada en la ecuación 4.6, la cual produciría el mismo grado de saturación (i.e., tasa de volumen – capacidad) para los movimientos críticos en cada fase.

$$g_i = \frac{y_m}{Y} C - nl \quad (4.9)$$

➤ *División de fase con el esquema de tres fases*

Basados en la metodología de igualdad en los grados de saturación descrita arriba, la división de fases para un esquema de tres fases puede ser determinado basados en la siguiente ecuación [44].

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_4 = C \quad (4.10)$$

$$\phi_5 + \phi_6 + \phi_8 = C \quad (4.11)$$

$$g_4 = g_8 = \max \left[\frac{y_4}{y_1+y_2+y_4} (C - 3l), \frac{y_8}{y_5+y_6+y_8} (C - 3l) \right] \quad (4.12)$$

$$g_i = \begin{cases} \frac{y_i}{y_1+y_2} (C - g_4 - 3l), & \text{para } i = 1,2 \\ \frac{y_i}{y_5+y_6} (C - g_8 - 3l), & \text{para } i = 5,6 \end{cases} \quad (4.13)$$

➤ *División de fase con el esquema de cuatro fases*

Para un esquema de cuatro fases, la división de fases se determina en base a las siguientes ecuaciones:

$$\phi_2 + \phi_4 + \phi_6 + \phi_8 = C + \Phi + \Phi = C + 2\Phi \quad (4.14)$$

$$\phi_1 + \phi_5 = C - \Phi \quad (4.15)$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_4 + \phi_5 + \phi_6 + \phi_8 = 2C \quad (4.16)$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_4 = \phi_5 + \phi_6 + \phi_8 = C \quad (4.17)$$

$$g_i = \frac{y_i}{y_2+y_4+y_6+y_8} (C + 2\Phi - 4l) = \frac{y_i}{Y} (C + 2\Phi - 4l), \text{ para } i = 2,4,6,8 \quad (4.18)$$

Una vez ϕ_2 ; ϕ_4 ; ϕ_6 y ϕ_8 son determinados con la ecuación 4.18 para una tasa igual de volumen capacidad, ϕ_1 y ϕ_5 son calculadas por las siguientes ecuaciones:

$$g_1 = C - \phi_2 - \phi_4 - l \quad (4.19)$$

$$g_5 = C - \phi_6 - \phi_8 - l \quad (4.20)$$

➤ *Cálculo de capacidad y demoras [44].*

- Movimientos externos

El modelo básico de capacidad para el movimiento externo m con fase i es calculado usando la ecuación 4.2 y el modelo determinístico de demoras para el movimiento m es calculado por:

$$d_m = d_1 + d_2 + d_3 \quad (4.21)$$

En la ecuación 4.21, d_1 es el primer periodo uniforme de retraso, determinado basado en el método de llegada acumulada y de partida (también conocido como el método del polígono de colas, el método de oferta y demanda, método de entrada y salida) [45]. Este método calcula el total de área limitada por las llegadas acumuladas y las curvas de partida [46]. En la ecuación 4.22 se muestra el cálculo del primer periodo para este método.

$$d_1 = \frac{0.5c(1-g_i/c)^2}{(1-\frac{g_i}{c}x_m)} \quad (4.22)$$

d_2 Es el segundo término de incremento y sobresaturación de demora, toma en cuenta los efectos del flujo de sobresaturación y asume al azar un flujo de llegada.

$$d_2 = 225 \left[(x_m - 1) + \sqrt{(x_m - 1)^2 + 16 \frac{x_m}{c_m}} \right] \quad (4.23)$$

d_3 Es el tercer término de demora debido a una cola al inicio del periodo de análisis.

- Movimientos internos

Los movimientos del tráfico dentro del intercambiador interno tienen patrones especiales de llegada y partida, directamente asociados con el tipo de esquema de fases del intercambiador diamante. El modelo de demora tipo HCM que es mostrado en la ecuación 4.22 no puede ser aplicado para estimar demoras precisas. PASSER III emplea un método llamado delay-difference-of-offset, originalmente desarrollado por Wagner [47]. El método predice la llegada de vehículos aguas abajo en una base de segundo a segundo basado en la separación y distancia entre las dos señales.

Las demoras y las colas son calculadas basadas en el método de llegadas y partidas acumuladas y el polígono de colas.

En general, las metodologías existentes para determinar el tiempo en el DI, la capacidad y la demora están limitadas a analizar cada intersección por separado.

- *Estimación Origen - Destino.*

Uno de los mayores requerimientos de datos de entrada para el modelo de operación de dos capacidades al igual que en el modelo IDIRMS es la matriz OD de demanda de tráfico. Los flujos OD pueden ser obtenidos de un estudio actual OD o pueden ser estimadas basados en conteos específicos.

Un modelo de optimización no lineal desarrollado por Zongzhong en 2004 [69] propone una metodología de cálculo para una estimación OD basado en conteos. La función objetivo puede ser expresada por la ecuación 4.40.

$$\begin{aligned} \text{Min } \sum_{a=1}^6 (VO_a - \sum_{d=1}^6 v_{a,d})^2 + \sum_{d=1}^6 (VD_d - \sum_{a=1}^6 v_{a,d})^2 + \sum_{m=1}^{14} (V_m - V'_m)^2 + \\ \sum_{r=1}^2 (R_r - R'_r)^2 \end{aligned} \quad (4.40)$$

Dónde:

$$\left\{ \begin{array}{l} V'_1 = v_{1,3} + v_{5,3} \\ V'_2 = v_{1,5} + v_{5,5} + v_{5,1} + v_{1,1} \\ V'_3 = v_{1,4} + v_{5,4} \\ V'_4 = v_{3,2} + v_{3,6} \\ V'_5 = v_{3,3} \\ V'_6 = v_{3,1} + v_{3,5} \\ V'_7 = v_{6,4} + v_{2,4} \\ V'_8 = v_{6,6} + v_{6,2} + v_{2,6} + v_{2,2} \\ V'_9 = v_{6,3} + v_{2,3} \\ V'_{10} = v_{4,1} + v_{4,5} \\ V'_{11} = v_{4,4} \\ V'_{12} = v_{4,6} + v_{4,2} \\ V'_{13} = v_{5,6} + v_{5,2} + v_{1,6} \\ V'_{14} = v_{6,5} + v_{6,1} + v_{2,5} \\ R'_1 = v_{3,1} + v_{4,1} + v_{5,1} + v_{6,1} \\ R'_2 = v_{3,2} + v_{4,2} + v_{5,2} + v_{6,2} \end{array} \right. \quad (4.41)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{2,1} \leq \left(p_{2,1} = \frac{v_{5,1}}{V'_2} \right) \leq \beta_{2,1} \\ \alpha_{10,1} \leq \left(p_{10,1} = \frac{v_{4,1}}{V'_{10}} \right) \leq \beta_{10,1} \\ \alpha_{6,1} \leq \left(p_{6,1} = \frac{v_{3,1}}{V'_6} \right) \leq \beta_{6,1} \\ \alpha_{14,1} \leq \left(p_{14,1} = \frac{v_{5,1}}{V'_{14}} \right) \leq \beta_{14,1} \\ \alpha_{8,2} \leq \left(p_{8,2} = \frac{v_{6,12}}{V'_8} \right) \leq \beta_{8,2} \\ \alpha_{12,2} \leq \left(p_{12,2} = \frac{v_{6,2}}{V'_{12}} \right) \leq \beta_{12,2} \\ \alpha_{4,2} \leq \left(p_{4,2} = \frac{v_{6,12}}{V'_4} \right) \leq \beta_{4,2} \\ \alpha_{13,2} \leq \left(p_{13,2} = \frac{v_{6,12}}{V'_{13}} \right) \leq \beta_{13,2} \end{array} \right. \quad (4.42)$$

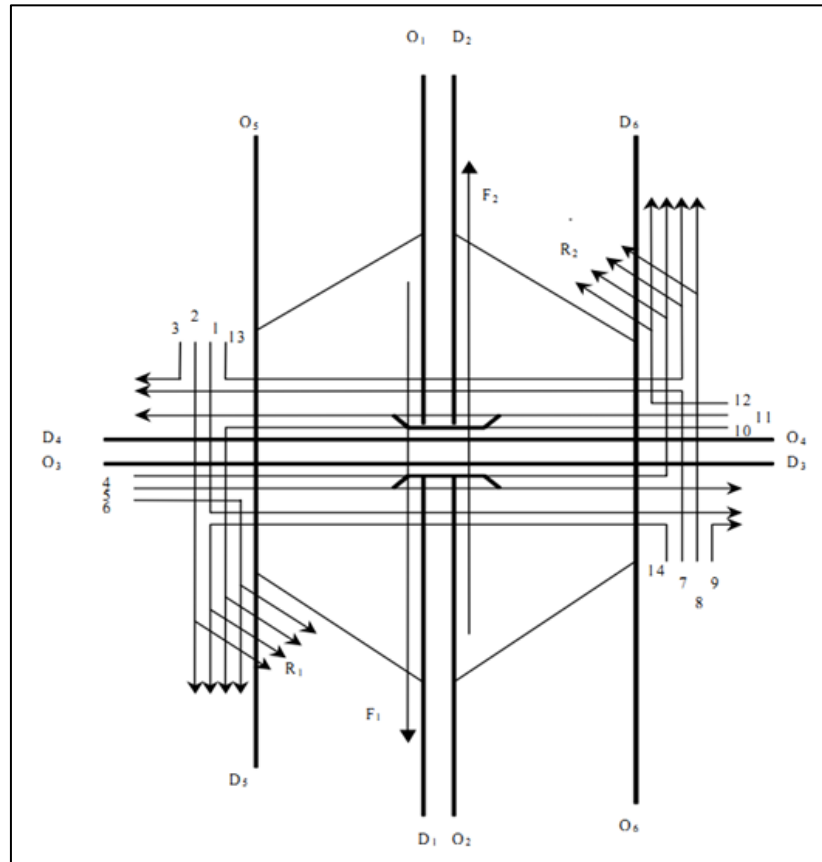
$$v_{0,d} \geq 0 \quad (4.43)$$

La función objetivo expresada en la ecuación 4.40 minimiza los errores entre la estimación de variables ($v_{0,d}, V'_m, R'_m$) y las variables medidas (VO_0, VD_d, V_m, R_r). La minimización se llevara a cabo con todos los flujos OD, $v_{i,j}$ sujetos en las

ecuaciones 4.41 a 4.43. La ecuación 4.41 establece la relación entre los flujos OD estimados y los flujos de los movimientos de giro estimados. La ecuación 4.42 establece un grupo adicional de límites para $p_{m,r}$, la proporción de tráfico en rampa para cada alimentación de movimiento. Cada $p_{m,r}$, es sujeto a los límites más bajos $\alpha_{m,r}$, y a los más altos límites $\beta_{m,r}$, los cuales serían determinados por estimación o medidos en campo. La ecuación 4.43 define que los flujos OD deben ser positivos.

En la siguiente figura se ilustran las convenciones existentes para los movimientos de tráfico y demanda en IDIRMS. Primero la demanda de tráfico en el sistema es definida por una matriz OD que incluye seis orígenes y seis destinos, los cuales pueden ser usados para derivar los 14 movimientos de giro de la DI, los dos flujos de la línea principal de la arteria y los dos flujos de la vía o rampa de llegada. La tabla 15 define la relación entre estas variable de flujo de tráfico.

Figura 48. Convenciones para IDIRMS



Fuente: Zongzhon (2004)

Tabla 15. Cálculo de demanda en movimientos de tráfico

Diamante / rampa	Localización	Movimiento	Movimiento de tráfico y flujo OD
<i>Diamond Interchange</i>	Rampa de llegada lado izquierdo	LT (M1)	$V_1 = v_{1,3} + v_{5,3}$
		TH (M2)	$V_2 = v_{1,5} + v_{5,5} + v_{5,1}$
		RT (M3)	$V_3 = v_{1,4} + v_{5,4}$
		U (M13)	$V_{13} = v_{5,6} + v_{5,2} + v_{1,6}$
	Arterial A-Dirección (Izquierda a derecha)	LT (M4)	$V_4 = v_{3,2} + v_{3,6}$
		TH (M5)	$V_5 = v_{3,3}$
		RT (M6)	$V_6 = v_{3,1} + v_{3,5}$
	Rampa de llegada lado derecho	LT (M7)	$V_7 = v_{6,4} + v_{2,4}$
		TH (M8)	$V_8 = v_{6,6} + v_{6,2} + v_{2,6}$
		RT (M9)	$V_9 = v_{6,3} + v_{2,3}$
U (M14)		$V_{14} = v_{6,5} + v_{6,1} + v_{2,5}$	
Arterial A-Dirección	LT (M10)	$V_{10} = v_{4,1} + v_{4,5}$	

	(Derecha a izquierda)	TH (M11)	$V_{11} = v_{4,4}$
		RT (M12)	$V_{12} = v_{4,6} + v_{4,2}$
<i>Rampa de llegada</i>	Rampa lado izquierdo	R1	$R_1 = v_{3,1} + v_{4,1} + v_{5,1} + v_{6,1}$
	Rampa lado derecho	R2	$R_2 = v_{3,2} + v_{4,2} + v_{5,2} + v_{6,2}$

Fuente: Zongzhon (2004)

4.2.2. Algoritmo del tráfico local de respuesta

Como se ha venido mencionando en este capítulo para el modelo IDIRMS no se considera la intersección diamante como un elemento aislado sino se incluye en su operación el sistema de vías o rampas de llegada, en este caso son tenidos en cuenta básicamente cuatro tipos de operación basados en el nivel de complejidad del algoritmo de control, los cuales son:

- Tiempo fijo.
- Tráfico local de respuesta.
- Arteria y rampa coordinada
- Sistema integrado arteria / superficie.

El modelo de operación de *tiempo fijo* es la forma más simple y opera a un ciclo constante, principalmente sirve para romper los pelotones de vehículos que van entrando de a un solo vehículo en los accesos a la arteria. Lo cual permitirá una suave fusión en la arteria y reducirá los accidentes debido a conflictos por vehículos que llegan a la intersección. Este modelo es más usado donde las condiciones de tráfico son predecibles.

El mayor inconveniente de este modelo es que la operación no reacciona a fluctuaciones temporales del tráfico en la arteria principal.

El modelo del *tráfico local de respuesta* puede ajustar automáticamente la tasa de llegada basada en las condiciones del tráfico actual en las proximidades de la vía

de llegada o rampa. Este modelo requiere instalación de detectores en la arteria principal. Controladores electrónicos y algoritmos de software pueden seleccionar apropiadamente una tasa de llegadas basadas en ocupación y en la tasa de flujo de los detectores de rampa y vía principal; por lo tanto el modelo de tráfico de respuesta puede generalmente entregar mejores resultados que el de tiempos fijos.

El modelo de *arteria y rampa coordinada* busca optimizar una sección múltiple de rampa de llegada a la vía arteria, a menudo basado en el control del fenómeno conocido como cuello de botella [48]. Generalmente un computador central supervisa numerosas rampas e implementa características de control, los cuales pueden anular instrucciones locales según la tasa de flujo. Esta configuración centralizada permite la que ninguna vía de llegada sea influenciada por condiciones de otras locaciones dentro de la malla. Adicionalmente el sistema puede también gestionar incidentes en la arteria, con más restricciones en la vía de llegada aguas arriba y menos restricciones en la vía de llegada aguas abajo del incidente.

Por último el modelo *integrado arteria / superficie* es el sistema de más alto nivel y ha generado un interés significativo en el estudio de esta materia [49].

Tal como un modelo intenta mantener operaciones óptimas para el interior del corredor, los cuales incluyen el sistema de vías de llegada o rampas y el sistema arterial. Debido al hecho de que la operación de las vías de llegada afecta directamente la operación de la vía arterial, debe tenerse en consideración la interacción cerrada entre las señales de estos sistemas viales para estas intersecciones. Como un resultado, los requerimientos de hardware para este modelo de operación son más complejos, requiriendo detectores aguas arriba y aguas debajo de la vía de llegada, así como una comunicación media y central unida a las señales de vía de llegada y señales de la calle arterial.

El principio básico detrás del modelo de tráfico local de respuesta, es que los datos tiempo real se utilizan para fijar el tipo de medición. El término tiempo real en realidad se refiere a los datos recuperados del tiempo anterior (1- intervalo minuto anterior) pero no a un instante.

El dato puede ser ocupación, velocidad y volumen de tráfico, recogidos por los detectores de la línea principal. Varios algoritmos para este modelo han sido desarrollados. El más común es basado en el concepto de la relación demanda – capacidad. La tasa de flujo es regulada de modo que la demanda de tráfico total de la arteria principal y de la rampa debería no exceder la capacidad de tal modo que no se dé el fenómeno del cuello de botella de la arteria en la fusión o en algún lugar aguas abajo de la fusión, Messer [50] describe el algoritmo en la siguiente ecuación:

$$M_r(t) = \omega [c_{Fr} - F''(t)] \quad (4.44)$$

Aplicando la relación básica de flujo – densidad y asumiendo una relación lineal entre la densidad y ocupación, la ecuación 4.44 se convierte:

$$M_r(t) = c_{Fr} - 2.51f_p\pi(t) \quad (4.45)$$

El algoritmo ahora se relaciona con la tasa de medición de la ocupación, la cual puede ser directamente obtenida de los detectores de la arteria. Para implementar el algoritmo mostrado en la ecuación 4.45, un grupo de planes predeterminados pueden ser establecidos y almacenados en un controlador de la vía de llegada.

Mientras que varios algoritmos pueden existir en diferentes formas, ellos normalmente siguen un principio similar de demanda – capacidad.

Probablemente el más conocido es el modelo ALINEA propuesto por Papageorgiou [51]. El algoritmo fue desarrollado basado en la realimentación del

concepto de control automático. Numerosos estudios también han llevado a variar el algoritmo ALINEA [52]. Mientras ALINEA ha sido usado en países de Europa, esta aplicación en Estados Unidos es algo limitada [53]. El algoritmo original ALINEA es descrito en la ecuación 4.46, donde se determina el $M_r(t)$, la tasa de llegada para el intervalo de tiempo t , pero será explicado en más detalle en la sección 4.2.7.

$$M_r(t) = M_r(t - 1) + K_R[\pi_m - \pi(t)] \quad (4.46)$$

4.2.3. Modelo del valor umbral

El principal propósito de este modelo es prevenir o minimizar la congestión en la arteria, reduciendo las colas de tráfico. Sin embargo se cree que esto solo puede ser posible cuando la demanda de la arteria alcance un valor umbral, de ahí el nombre de este modelo

Cuando la demanda de la arteria es baja de tal forma que el tráfico que viene de la vía de acceso no tiene dificultad y encuentra espacios para unirse, no sería necesaria la aplicación de este modelo.

Es por eso que es necesario definir un valor umbral que permita conocer el escenario crítico del sistema vial durante periodos de tiempo diferentes en el día.

En la práctica la mayoría de ciudades de Estados Unidos donde han sido implementado este modelo se usan planes time-of-day [54] para determinar el tiempo que debe operar el sistema vial en unas determinadas condiciones de capacidad, basado en tiempos preestablecidos del día (típicamente periodos pico) sin tener en cuenta las condiciones de la arteria. Basados en estudios recientes [55] de algunas de las mayores áreas metropolitanas donde el modelo ha sido implementado, solo en pocas ciudades se aplica alguna clase de umbral para determinar las condiciones de operación específica. Estos umbrales son mostrados en la tabla 16.

Tabla 16. Umbrales para sistemas de DI en Estados Unidos

Localización	Umbral
Denver, Colorado	Alguno de los siguientes parámetros por tres minutos: *Volumen: 1900 vphpl *Ocupación: 20% *Velocidad: ≤ 35 mph
Chicago , Illinois	Ocupación arteria principal : 11.7%
Seattle, Washington	*Volumen: 1900 vphpl *Ocupación: 20%
Milwaukee, Wisconsin	Tasa de volumen/ capacidad *Área urbana: 0.7 *Área rural: 0.6 - 0.65

Fuente: Mahendran (2009)

La mayoría de estos umbrales fueron determinados basados en una experiencia pasada y observación en campo. Como se puede ver, los umbrales usados en Denver, Colorado, son en realidad cerca de las condiciones de capacidad, las cuales pueden ser muy altas para implementar en un sistema de intersecciones diamante, podría ser útil para la intersección divergente diamante.

- *Metodología de implementación para el modelo del valor umbral*

Las metodologías de modelado para operación de DI y DDI usando el modelo del valor umbral pueden ser clasificadas dentro de dos grandes categorías. La primera categoría se refiere a metodologías de modelación basadas en la llegada acumulada y el método de partida [56].

Las ecuaciones 4.47 a la 4.48 proveen una descripción generalizada del método de una manera similar descrita por Gartner [57]. Dada la demanda de tráfico, $V(t)$ y la capacidad de la instalación, c , la función de llegada acumulada, $A(t)$, la tasa de partida, $O(t)$, y la función acumulada de partida, $D(t)$, pueden ser determinada.

Subsecuentemente, las medidas del desempeño de la longitud de cola, $q(t)$, y demora total, TD , pueden ser obtenidos.

$$\frac{dA}{dt} = V(t) \quad (4.47)$$

$$\frac{dD}{dt} = O(t) = \begin{cases} c, & \text{si } A(t) > D(t) \\ V(t), & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (4.48)$$

$$q(t) = A(t) - D(t) \quad (4.49)$$

$$\frac{dq}{dt} = V(t) - O(t) \quad (4.50)$$

$$\frac{dT D}{dt} = q(t) \quad (4.51)$$

El principio básico del método es mostrar la llegada acumulada de vehículos y la curva de partida. La separación horizontal entre las dos curvas representa la demora para un vehículo individual, y la separación vertical representa la longitud de cola en un instante en términos de número de vehículos. El área total limitada por las dos curvas representa la demora total de vehículos en vehículos por hora o vehículos por segundo, ver figura

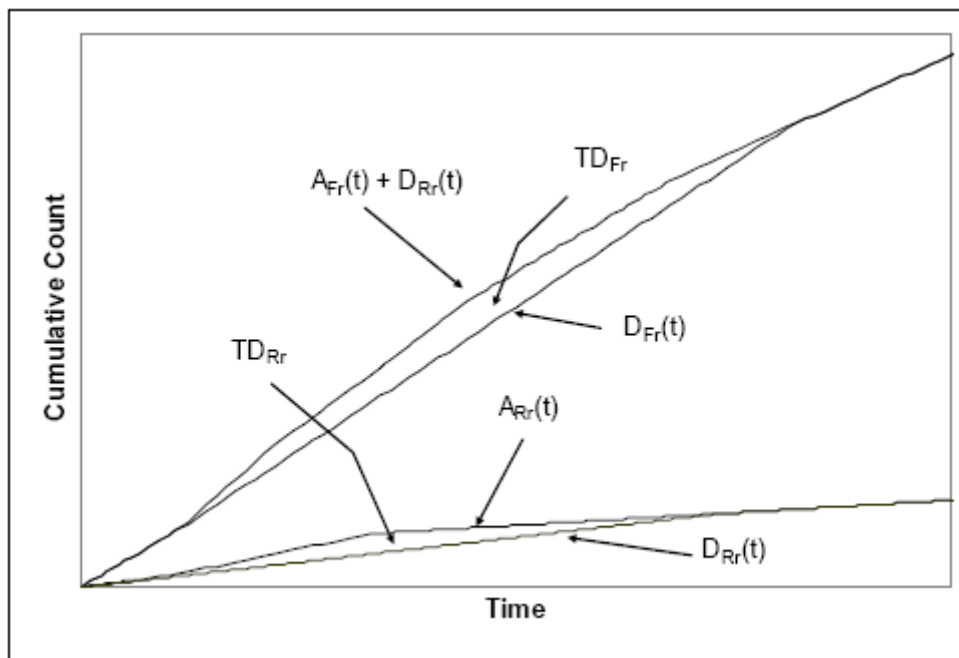
Las expresiones matemáticas que están dadas de la ecuación 4.52 a la 4.54, para calcular el total de demoras de la autopista, TD_{Fr} y para la rampa TD_{Rr} , mostrado en la figura anterior.

$$TD_{Fr} = \int [A_{Fr}(t) + D_{Rr}(t) - D_{Fr}(t)] dt \quad (4.52)$$

$$TD_{Rr} = \int [A_{Rr}(t) - D_{Rr}(t)] dt \quad (4.53)$$

$$TD_{Tr} = TD_{Fr} + TD_{Rr} \quad (4.54)$$

Figura 49. Método de la llegada y partida acumulada



Fuente: Hurdle (2001)

El método de la llegada acumulada y de partida es presentado en forma de funciones continuas. La forma discreta del método es a menudo usada cuando la modelación de la operación de la arteria usa pasos de tiempo. El método puede ser aplicado a modelos de colas y demoras en cualquier tipo de instalación de tráfico. Sin embargo diferentes instalaciones podrían tener diferentes patrones de llegada y partida. Por ejemplo, la partida de un movimiento de tráfico en una intersección señalizada puede ser no continua.

La otra categoría es relacionada con modelos macroscópicos aplicando la dinámica de fluidos a la teoría del flujo de tráfico y las técnicas de análisis de ondas de choque [58, 59]. El modelo macroscópico basado en la onda de choque fue establecido en el principio de la conservación de masa de la teoría de dinámica de fluidos, la cual es expresada en la ecuación 4.55:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial b} = M_r(t) - M_0(t) \quad (4.55)$$

En la ecuación 4.55, la relación entre densidad de tráfico ρ , y tasa de flujo, v , es expresada en un dominio continuo de tiempo y espacio usando la ecuación diferencial. La ley de conservación del flujo es mantenida considerando el flujo en la vía de llegada, $M_r(t)$, y el flujo de la vía de salida $M_0(t)$, la ecuación 4.55 puede ser expresada también en la siguiente forma discreta.

$$n_k(t + 1) = n_k(t) + \Delta T [v_{k-1}(t) - v_k(t) + M_{r,k}(t) - M_{0,k}(t)] \quad (4.56)$$

Dividiendo ambos lados por la longitud de segmento Δ_k :

$$\rho_k(t + 1) = \rho_k(t) + \frac{\Delta T}{\Delta_k} [v_{k-1}(t) - v_k(t) + M_{r,k}(t) - M_{0,k}(t)] \quad (4.57)$$

Si la relación flujo-densidad es conocida i.e., el flujo $v_k(t)$ puede ser expresado por las densidades como en las formas $V[\rho_k(t), \rho_{k+1}(t)]$, la ecuación arriba se convierte en un modelo de flujo de tráfico y puede ser resuelto iterativamente dando las condiciones iniciales del valor de $\rho_0(0)$. La velocidad de la onda de choque en la posición del segmento k y tiempo $t, u_{s,k}(t)$ es expresada por:

$$u_{s,k}(t) = \frac{V[\rho_{k+1}(t)] - V[\rho_k(t)]}{\rho_{k+1} - \rho_k} \quad (4.58)$$

Alternativamente, un modelo de tráfico puede ser establecido si la relación flujo-velocidad es conocida, tal como en la forma $u_k(t) = U[\rho_k(t)]$. Entonces la tasa de flujo puede ser derivada basada en la relación fundamental entre flujo, velocidad y densidad:

$$v_k(t) = \rho_k(t) \cdot u_k(t) = \rho_k(t) \cdot U[\rho_k(t)] \quad (4.59)$$

La relación flujo densidad y la relación velocidad-densidad muestran un significativo interés investigativo y tienen resultados en varios modelos de tráfico para operación de intersecciones diamante.

Mientras el modelo del valor umbral y el modelo IDIRMS arrojarían diferentes estimaciones de longitudes de cola, muchos investigadores han demostrado la compatibilidad de los dos métodos en la estimación del tiempo de viaje y demoras en instalaciones de la vía arterial [60].

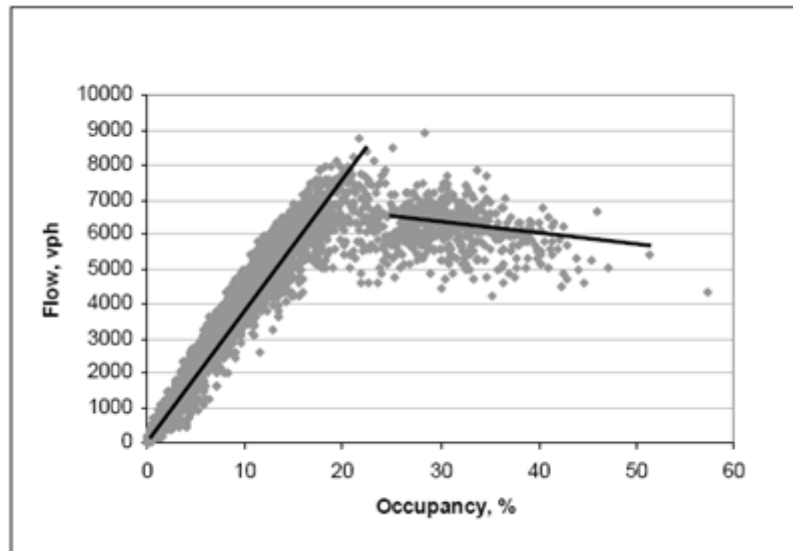
4.2.4. El modelo de las dos capacidades en la operación de intersecciones divergente diamantes.

A diferencia de otras intersecciones, las intersecciones diamante y especialmente las divergente diamante tienen una única característica operacional descrita como el fenómeno de dos capacidades, de aquí el nombre de este modelo operacional, lo que sugiere es que la capacidad de una intersección de este tipo tiene dos regímenes distintivos: el valor de la capacidad durante flujo libre y el valor de capacidad durante la congestión y el flujo medido en una posición activa el fenómeno de cuello de botella [61]. Este modelo originalmente definido por Daganzo [62] afirma que un cuello de botella no es influenciado por otro cuello de botella de la siguiente intersección. Las dos capacidades son definidas como la capacidad a flujo libre c_F y la capacidad de descarga de colas, c_Q . La transición de la condición de flujo libre a la condición congestionada es a menudo referida como el rompimiento de la arteria, caracterizada por una repentina caída de la velocidad, un incremento en la densidad y quizás una caída en la tasa de flujo [63, 64].

La figura 50 se ilustra el escenario de rompimiento y el fenómeno de dos capacidades, los cuales están basados en datos recogidos por un detector de campo del Ministerio de Transporte de Ontario. La figura 51 es una muestra de ocupación versus flujo. Dos regiones distintivas, la región de flujo libre y la región

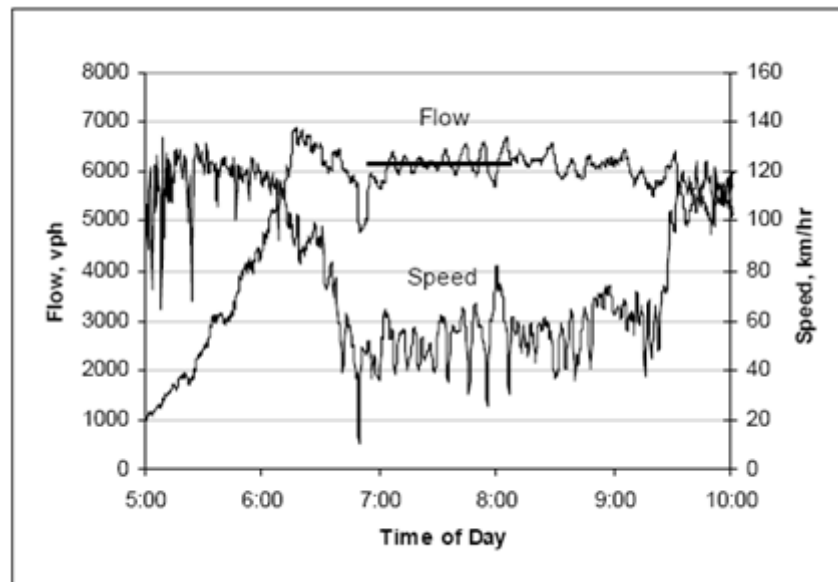
de congestión. Puede además ser observada una desconexión entre las dos regiones.

Figura 50. Diagrama flujo - ocupación



Fuente: Persuad (2001)

Figura 51. Diagrama de la relación flujo – velocidad para una serie de tiempo



Fuente: Persuad (2001)

Hall y Agyemang [65] enfatizan en la importancia de cómo los flujos pueden ser medidos. Primero, la ubicación del cuello de botella donde el flujo es medido tiene que estar libre de congestión aguas abajo, ya que cualquier disminución de colas debería ser la única causa para que la arteria se una a sí misma. Segundo la ubicación de la medida del flujo puede no ser aguas arriba de la unión vía de llegada - arteria porque esto no reflejaría la verdadera capacidad debido a que parte de la capacidad sería consumida por el tráfico de la vía de llegada.

Tercero, el intervalo de tiempo para la medida de flujo es también crítico. Sin embargo flujos altos pueden ser logrados dentro de un corto periodo de tiempo, por lo menos 15 minutos como es definido en el HCM para el flujo de capacidad. Otro punto importante que Hall y Agyemang - Duah determinaron fue que la medida del flujo de pre-rompimiento debe estar restringida al periodo cuando la demanda está cerca de la capacidad. Compilando con las condiciones de arriba, Hall y Agyemang-Duah seleccionaron sitios de unión de arterias en Toronto y concluyeron que el modelo de dos capacidades es aplicable y la pérdida de capacidad después de la ruptura es cerca del 6% basado en los estudios en sitio. La literatura que soporta el modelo de dos capacidades incluye estudios por Cassidy y Bertini [66], Persuad [63], entre otros. Estos estudios reportan que el rango de pérdida de capacidad está entre 2 y 16 por ciento una vez ocurre la ruptura.

En la literatura también fue encontrada la disputa del modelo de dos capacidades, el más importante es probablemente el de Banks [67]. El estudió la aplicación de este modelo usando datos recogidos en cuatro sitios en San Diego, California y soportó la aplicación de este modelo mientras examinaba los flujos en carriles individuales. Encontrando que los flujos se incrementan después de haber ocurrido la ruptura en tres de los 4 sitios examinados. Ringert y Urbanik [68] estudiaron el modelo en tres uniones de vías arteriales principales de Texas, encontrando que el flujo cola-descarga fue alto en un sitio, bajo en un sitio y no fue diferente en el otro sitio.

Examinando las metodologías usadas en esos estudios, algunos factores sobresalen llevando a generar conclusiones. Como por ejemplo, Banks usa una colección de datos aguas arriba de la unión de la arteria con la vía de llegada (i.e., una ubicación que no incluye flujo de rampas), las cuales pueden no reflejar la verdadera capacidad de la arteria. Los altos flujos cola-descarga pueden ser debido a la medida del flujo de pre-ruptura que no ha alcanzado el nivel de capacidad, el cual puede ser encontrado a menudo. Estrictamente hablando, la verdadera capacidad a flujo libre puede no ser más baja que la capacidad cola-descarga si existe el fenómeno de cuello de botella.

4.2.5. DRIVE (Diamond interchange and ramp metering via evaluation)

El desarrollo del modelo DRIVE (Diamond interchange ramp metering integration vía evaluation) se desarrolló como un software de computador que implementa el modelo conocido como ODI (Operation diamond interchange) [70], el cual fue diseñado para realizar cálculos y medidas en la DI, y en las vías de llegada a las arterias principales de estas intersecciones. DRIVE es caracterizado por ser un modelo de análisis y simulación mesoscopica. La siguiente tabla resume la mayoría de parámetros y variables de entrada y salida para DRIVE.

Tabla 17. Parámetros de entrada y salida modelo DRIVE

Input/Output	Datos de entrada y medida de rendimiento	
<i>Input</i>	Demanda de tráfico	Matriz OD
	Geometría y flujo de tráfico	<i>Diamante</i> : Espacio de almacenamiento interno, configuración de carril, espaciamiento del diamante, velocidad en la arteria principal <i>Rampa o vía de llegada</i> : almacenamiento de colas, tasa de flujo y tasa de colas. <i>Arteria</i> : Capacidad a flujo libre desviación estándar, capacidad de cola - descarga
	Tiempo de semáforos	Longitud de ciclo, esquema de fases, tiempo perdido, intervalo de llegadas.
	Otro	Tipo de control de giro derecho, tipo de

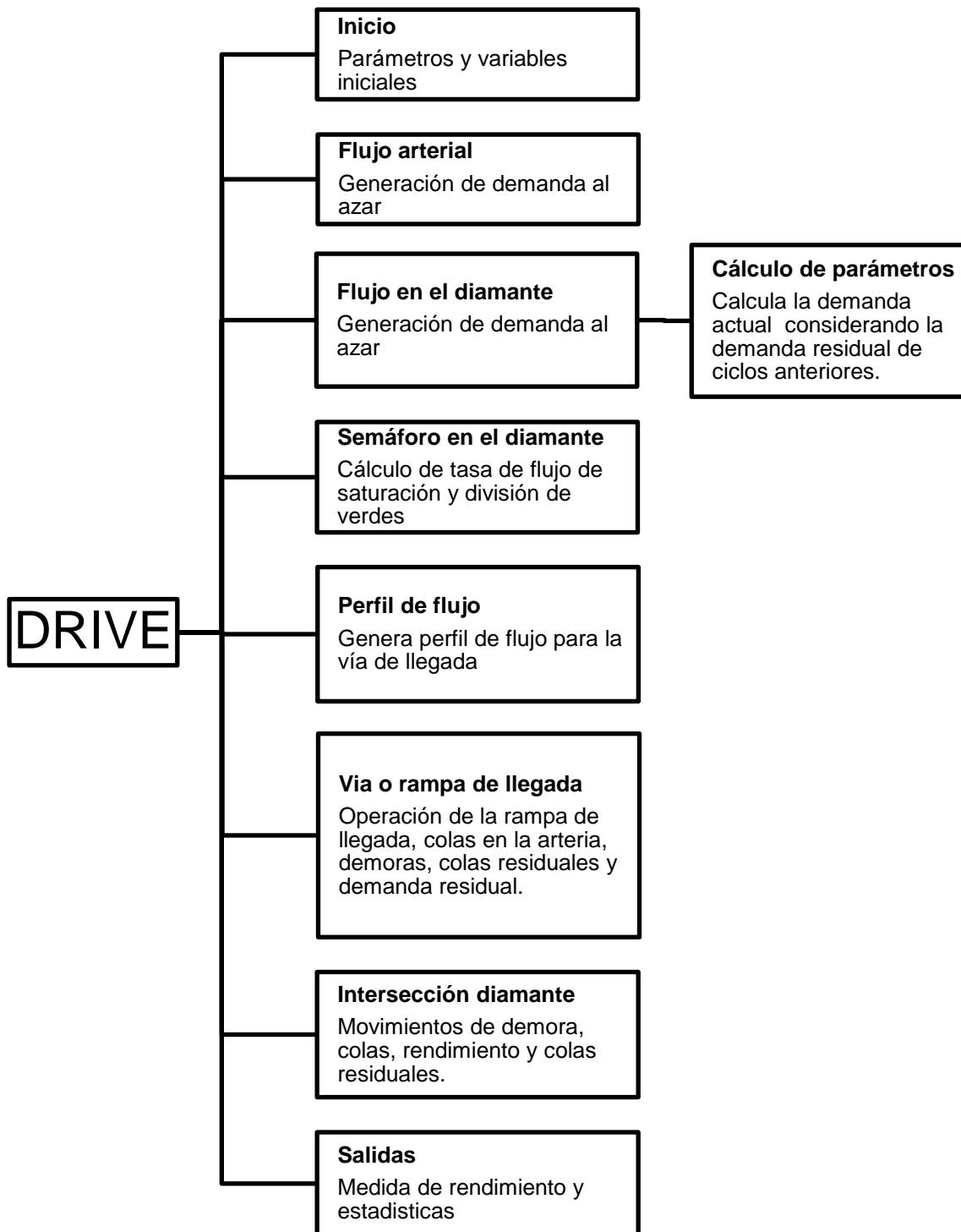
		control semafórico
<i>Output</i>	Intersección diamante	Demora total, demora promedio, máxima cola, cola promedio y cola residual.
	Rampa o vía de llegada	Cola máxima, cola promedio, demora total, demora promedio, tiempo de duración del flujo de cola.
	Arteria	Rendimiento, demora total, demora promedio.
	Perfiles resumen	Longitud de cola en todos los sistemas viales.

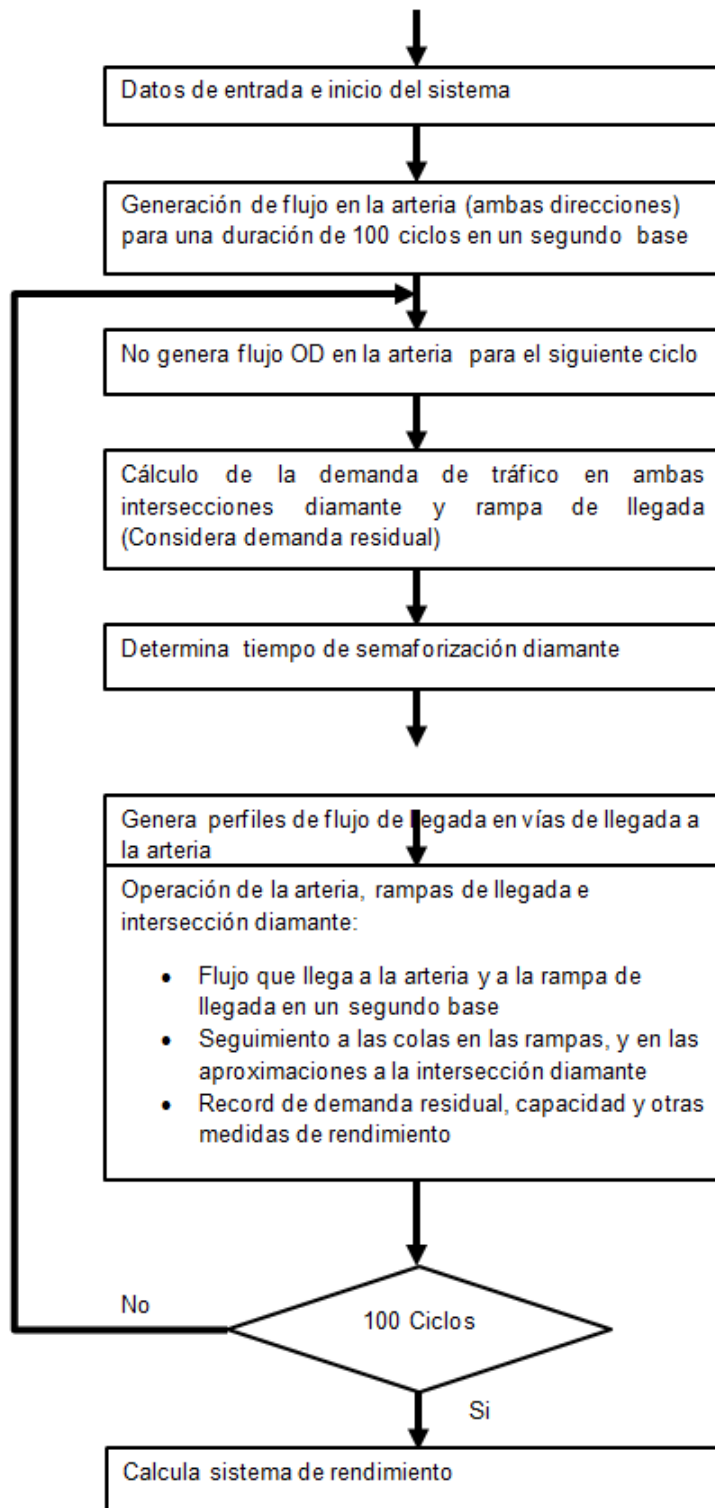
Fuente: McCubbins (2005)

Los requerimientos de datos de entrada principalmente incluyen estos requerimientos para análisis individual de cada instalación de tráfico dentro de DRIVE. Sin embargo el análisis considera la interrelación entre estos componentes de sistemas de una forma integrada y proporciona medidas de desempeño con base en un proceso de modelado integral.

El software DRIVE consiste en un gran número de modelos y módulos computacionales, los cuales son descritos en la figura 52, junto con el diagrama de flujo de trabajo de modelado.

Figura 52. Modelo DRIVE





Fuente: McCubbins (2005)

La generación de demanda de flujo de tráfico estocástico DRIVE se compone por dos componentes: la demanda de la arteria principal (i.e., flujos aleatorios con significado de $v_{1,1}, v_{2,2}$) y la demanda de la calle superficial (i.e., de todos los otros flujos OD). La distribución de Poisson ha sido ampliamente usada para generar flujos de tráfico aleatorios en estudios de problemas de tráfico. Por lo tanto en DRIVE la distribución de Poisson es usada para generar las demandas de tráfico para los flujos OD de la vía que llega, mientras que una distribución normal fue usada para generar la demanda de la autopista principal.

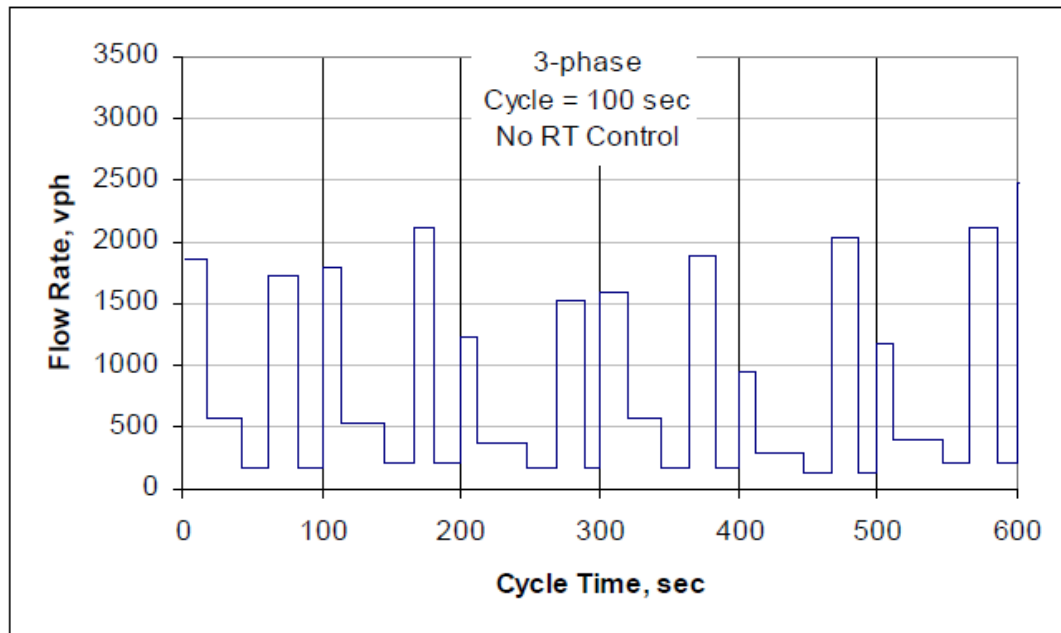
Cabe señalar que los flujos se generan al azar una vez en cada ciclo para la demanda de la calle que llega, consistente con la medida previa de que la demanda de tráfico dentro de un ciclo particular es uniforme. Para la demanda de la arteria, sin embargo los flujos son generados una vez cada segundo con el fin de modelar adecuadamente el algoritmo de rampa de medición y las operaciones de la autopista.

La longitud de los intervalos usados para generación de variables aleatorias tiene un impacto significativo en la variación de los flujos generados. La variación ha estado en un rango razonable para un modelo más real de la operación de tráfico. Si la variación es muy alta, el análisis tiende a predecir peores indicadores de desempeño. Por el otro lado si la variación no es lo suficientemente alta, el análisis tiende a predecir mejor la medida del desempeño.

DRIVE produce un conjunto completo de medidas de desempeño, parte de la información más útil de la unidad está relacionada con el rendimiento en la arteria en lo que tiene que ver con la disminución de colas, que puede ser utilizado para juzgar si existen problemas para el funcionamiento del sistema. Además de los resultados numéricos de salida DRIVE genera resultados gráficos con las distribuciones de flujo para cada uno de los ciclos planteados en cada uno de los elementos que componen el sistema vial, en la siguiente figura se muestra un

ejemplo de unos resultados obtenidos al aplicar el modelo a un intercambiador ubicado en Arlington, Texas en la vía arterial Mayfield Road/SH 360.

Figura 53. Ejemplo de resultados gráficos arrojado por DRIVE



Fuente: McCubbins (2005)

4.2.6. ICS (Modelo de la estrategia de control integrado)

El modelo conocido como ICS por sus siglas en inglés para Integrated control strategies o estrategias de control integrado fue desarrollada basado en dos muy comunes esquemas de fases para intersecciones diamante, el esquema de tres fases básico y TTI o cuatro fases, su objetivo principal es mantener las vías de llegada en operación de tal forma que no interrumpen o afecten la operación de la vía arterial. Este modelo requiere de un software de microsimulación para llevar a cabo la captura de los detalles y la dinámica de las operaciones.

Uno de los elementos clave para un exitoso desarrollo e implementación de ICS es

lograr una mejor gestión de los recursos disponibles en información de tráfico para varias condiciones de flujo. El ICS debe estar diseñado para responder a las condiciones específicas de tráfico, tales como la congestión de los tráficos recurrentes y no recurrentes. El ICS debe ser aplicable en operaciones en tiempo real de tráfico, donde el resultado por lo general sólo puede ser medido, pero no así previsto. La clave para una exitosa estrategia operativa se basa en la identificación de todos los elementos críticos y determinar qué elementos pueden ser gestionados y controlados.

El ICS se puede clasificar en tres categorías [71], a cada categoría trata de unas condiciones específicas de tráfico:

- (a) De bajo nivel de integración
- (b) Congestión no recurrente
- (c) Congestión recurrente

A continuación se hace una descripción de estas tres categorías

➤ *Bajo nivel de integración*

Esta categoría es simplemente lo que se podría lograr a través de gestión eficiente de los recursos disponibles sin tener que adquirir más detección y equipos sofisticados de control. Ejemplos de estas estrategias pueden incluir ajustar la duración del ciclo y se divide en el cruce de diamante, siendo más eficiente el tráfico de la vía tipo rampa pero dependiendo de la ubicación adecuada del detector para la cola de antelación.

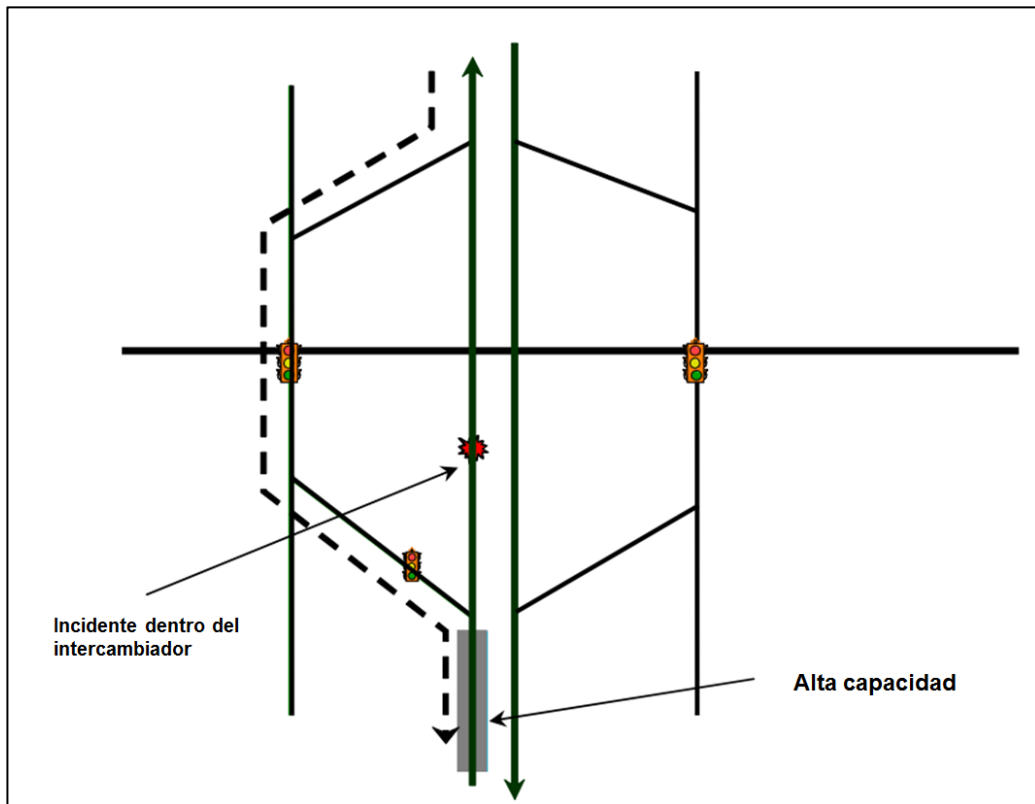
El ajuste de la duración del ciclo del semáforo en la intersección diamante, se divide y puede resultar en menores colas cíclicas que son manejables con los recursos disponibles. Estos ajustes a las operaciones de medición pueden implicar el cambio de las tasas de dosificación máximas y mínimas para permitir una mayor

flexibilidad para los flujos y de esta forma poder aprovechar mejor la capacidad de la arteria principal. Una alternativa para aumentar la capacidad es permitir la entrada múltiple por la fase verde (también se conoce como medición de volumen). Estas estrategias de bajo nivel de integración son principalmente de ajuste con los recursos existentes y por lo tanto pueden ser tratados como medidas de mitigación en condiciones de baja demanda de tráfico. El modelo de la unidad puede ser utilizado para realizar evaluaciones de las condiciones del tráfico.

➤ *Congestión no recurrente*

También se conoce como congestión relacionada con el incidente, donde un cambio dramático en los patrones de flujo de tráfico puede resultar. A menudo tráficos no recurrentes pueden generar una turbulencia importante para las operaciones de tráfico normal. Los incidentes pueden bloquear los carriles de la arteria principal, distraer a los conductores y reducir así significativamente la capacidad de la arteria. Estos hechos dan lugar también a cambios en los patrones de viaje debido a la desviación del tráfico de las rutas de viajes de rutina. El cambio en el patrón de viaje y la desviación del tráfico dependerá de la naturaleza del incidente tales como su ubicación y su gravedad.

Figura 54. Incidente dentro del intercambiador



Fuente: Sharma (2005)

La figura 54 muestra un incidente ocurrido en el interior del intercambio, dando lugar a la desviación del tráfico a través de la rampa de salida, y la demanda de la rampa de acceso aumentará, mientras que la demanda de la arteria principal en dicho tramo disminuirá.

Por otro lado cuando los incidentes se producen aguas abajo de la rampa de acceso (véase la figura 55), esto se traduciría en una reducción de la capacidad de la arteria principal. Mientras que el tráfico puede desviarse a través de la rampa de salida y tratar de entrar a la arteria más adelante.

Por lo tanto, las estrategias para hacer frente a un incidente puede implicar medidas de control de tráfico, tales como cierre de rampa. Lo cual se traduciría en

período prolongado (por ejemplo, por lo menos 30 minutos o más). Tanto la congestión a corto plazo y largo plazo se encuentran en la operación de todos los días para este tipo de intersecciones.

Bajo condiciones de congestión a corto plazo la formación de colas en el diamante puede o no ocurrir dependiendo de la duración del periodo y si para la congestión hay suficiente espacio de almacenamiento entre la rampa y la intersección.

Para evitar que se produzcan colas el modelo implementa un ajuste de la frecuencia de la señal en la intersección diamante. Por ejemplo, los movimientos de tráfico que alimentan de la rampa o vía de llegada se pueden restringir como una medida de control.

4.2.7. ALINEA

El modelo que utiliza el algoritmo ALINEA descrito en la ecuación 3.26 puede reaccionar suavemente a los cambios de flujo de tráfico en la arteria principal bajo flujo libre y condiciones de congestión [72]. La ocupación es directamente relacionada a las condiciones del tráfico. Donde la medida de ocupación, $\pi(t)$, es menos que el límite de ocupación, π_m , un valor positivo resulta para el segundo término en el lado derecho de la ecuación. Como un resultado, la tasa de llegada de flujo se irá incrementando para permitir que más vehículos entren a la arteria principal. De manera similar la tasa de llegada será reducida cuando la medida de ocupación exceda el límite del valor de ocupación. El algoritmo ALINEA también tiene la ventaja de una fácil implementación y calibración porque solo los parámetros K_R y π_m , necesitan ser calibrados.

Este modelo maneja el concepto de operación integrada entre el sistema de señales de la calle de llegada y el sistema de control de la arteria principal. La existencia de metodologías de modelado son basadas en demandas de tráfico

determinísticas sin consideración de flujos de tráfico aleatorios. Esta metodología fue desarrollada para superar las deficiencias de los modelos existentes. El mejoramiento en la metodología fue diseñado para realizar análisis operacional sobre múltiples ciclos, con la consideración de variaciones aleatorias del flujo de tráfico.

El modelo también hace uso del método de la llegada acumulada y partida, el cual es usado para modelar las demoras y las colas para los movimientos externos en la DI.

El modelo para la medición de colas y demoras para movimientos internos (i.e., el giro izquierdo y movimientos a través dentro del intercambiador) es basado en el principio básico del método de delay-difference-of-offset. Los movimientos internos tienen un único patrón de llegada y de partida determinados basados en el esquema de fases diamante, espaciamiento y flujos de tráfico. Los perfiles de flujo son representados por dos tipos de esquemas de fases: tres fases y cuatro fases. El cálculo de los parámetros relacionados, demoras y colas son expresadas en forma matemática.

A continuación se muestra los principios básicos de este modelo para la reducción de la demanda, dicha reducción de la demanda puede ser aplicado por igual a todos los movimientos o a uno solo específicamente. Cuando la reducción de la demanda se aplica a más de un movimiento, se usa una tasa igual de v/c para determinar los tiempos adecuados para el semáforo de la intersección diamante. Cuando la reducción de la demanda se aplica a un solo movimiento, la cantidad exacta en la reducción de los tiempos verdes se puede calcular.

La demanda normal de tráfico en la vía de llegada $R1$ es mostrada en la ecuación 3.44, nótese que el rendimiento u_m es usado en la ecuación en lugar de la demanda V_m .

$$R_1 = u_2 p_{2,1} + u_6 p_{6,1} + u_{10} p_{10,1} + u_{14} p_{14,1} \quad (4.60)$$

Con esta demanda, la longitud de la cola puede ser llamada como q_{R1} , la cual es Δq_{R1} más larga que el espacio de almacenamiento de la cola Q_{R1} .

$$\Delta q_{R1} = q_{R1} - Q_{R1} \quad (4.61)$$

La tasa necesaria de reducción de flujo por hora Δ_{R1} es obtenida de:

$$\Delta_{R1} = \frac{3600 \Delta q_{R1}}{C} \quad (4.62)$$

Con diferentes esquemas de fases de semaforización para intersecciones diamante la reducción en la demanda puede ser obtenida diferencialmente. Con el esquema de cuatro fases, el rendimiento para $M2$ y $M10$ puede ser reducido reduciendo la división de fases de $\phi 4$ y $\phi 6$. El tiempo extra puede entonces ser asignado a $\phi 8$ y $\phi 2$. Las siguientes ecuaciones muestran este procedimiento.

$$\frac{V_2}{c_2} = \frac{V_{10} + V_{11}}{c_{10,11}} \quad (4.63)$$

$$\frac{V_2 C}{g'_4 S_2} = \frac{(V_{10} + V_{11}) C}{g'_6 S_{10,11}} \quad (4.64)$$

$$\frac{g'_4 S_2}{C} p_{2,1} + \frac{g'_6 S_{10,11} V_{10}}{(V_{10} + V_{11}) C} p_{10,1} = (u_2 p_{2,1} + u_{10} p_{10,1}) - \frac{3600 \Delta q_{R1}}{C} \quad (4.65)$$

Despejando g'_4 y g'_6

$$g'_4 = \frac{V_2 [C(u_2 p_{2,1} + u_{10} p_{10,1}) - 3600 \Delta q_{R1}]}{(V_2 p_{2,1} + V_{10} p_{10,1}) S_2} \quad (4.66)$$

$$g'_6 = \frac{(V_{10} + V_{11}) [C(u_2 p_{2,1} + u_{10} p_{10,1}) - 3600 \Delta q_{R1}]}{(V_2 p_{2,1} + V_{10} p_{10,1}) S_{10,11}} \quad (4.67)$$

4.3. MODELOS DE MICROSIMULACIÓN

Como se puede observar en los subcapítulos anteriores los modelos matemáticos empleados en la operación de intersecciones diamante pueden ser de dos tipos: modelos macroscópicos de planeamiento estratégico orientados al modelado de flujos, a nivel tanto regional como urbano, y modelos microscópicos de tránsito, basados en las entidades vehiculares mismas. Los primeros poseen base macroeconómica y consideran la interacción entre la oferta y la demanda de transporte, mientras que los segundos reproducen las características operativas de la infraestructura y de las entidades de flujo de los sistemas.

A medida que las necesidades de la investigación han aumentado, se han ido desarrollando software que traen incorporado estos modelos matemáticos, facilitando el trabajo de los analistas, en cuanto a los procesos iterativos para la obtención de resultados, esto es debido a que en problemas con características de complejidad y magnitud como el de control de tráfico urbano no es viable validar las estrategias de control directamente sobre la malla vial, la utilización de plataformas de simulación se encuentra fundamentalmente ligada a las estrategias de control de tráfico urbano. Por esta razón, es importante identificar qué plataformas de simulación se están utilizando en países del mundo, tanto por la comunidad académica en general como por las autoridades distritales y municipales a través de consultorías por parte del sector privado para llevar a cabo su gestión.

Por la gran cantidad de plataformas de simulación existentes, se hace necesario llevar a cabo una categorización adecuada para sintetizar las diferentes alternativas. Las plataformas de simulación pueden, entonces, ser clasificadas de acuerdo al modelo de tráfico que utilicen. Estos modelos pueden ser macroscópicos, microscópicos o mesoscópicos [73].

- *Modelos macroscópicos*: Este tipo de modelos es, en general, apropiado para aplicaciones de gran escala donde las principales variables de interés se encuentran relacionadas con las características del flujo [74]. Su calibración puede llevarse a cabo de manera relativamente sencilla utilizando, por ejemplo, sensores de bucle inductivo [75]. Entre las plataformas de simulación macroscópica más relevantes se encuentran TRANSYT-7F, VISUM, FREFLO, NETVACI, TransCAD, KRONOS, AUTOS, EMME/2, METANET y METACOR.
- *Modelos mesoscópicos*: Los modelos mesoscópicos presentan una aproximación intermedia entre los microscópicos y los macroscópicos en la medida en que mezclan conceptos y herramientas de ambos modelos al analizar el comportamiento de grupos de conductores [76]. Las plataformas de simulación que utilizan modelos mesoscópicos son, entre otras, METROPOLIS, DYNASMART, DYNAMIT e INTEGRATION.
- *Modelos microscópicos*: Estos modelos, como su nombre sugiere, presentan la escala más pequeña para el acercamiento al análisis de los sistemas de tráfico urbano. En este sentido, sus variables de interés se relacionan con el comportamiento de vehículos individuales respecto a la infraestructura y a los demás vehículos en ella. Cabe anotar que el hecho de que este tipo de modelos procuren representar comportamientos humanos aumenta en gran medida su complejidad y costos. Entre las plataformas de microsimulación más relevantes están INTRAS, FRESIM, MITSIM, NETSIM, CORSIM, VISSIM, TransModeler, THOREAU, FLEXSYT-II y AIMSUM [77].

Cada uno de estos modelos se basa en metodologías que se establecen según el tipo de control ejercido en la intersección (en lazo abierto o cerrado), y la interacción con las intersecciones circundantes (aisladas o coordinadas), como se muestra a continuación.

4.3.1. Estrategias de tiempo fijo

Haciendo uso de registros históricos de flujo y densidad vehicular, las estrategias de tiempo fijo son ajustadas para periodos de tiempo largos donde dichos parámetros se asumen constantes. Lo anterior puede resultar poco acertado en contextos con demandas de alta variabilidad o con usual presencia de condiciones no convencionales (e.g. accidentes, disturbios, eventos), y conlleva el hecho de que este tipo de estrategias sólo pueda ser aplicado bajo condiciones no saturadas de la vía. A continuación, se hace un breve resumen de las técnicas y algoritmos más representativos que conforman las estrategias de tiempo fijo, primero, desde el enfoque de intersección aislada y, luego, desde el punto de vista coordinado.

➤ *Control de intersecciones aisladas con tiempos fijos*

En este tipo de estrategias, los valores de tiempos de verde y de fase para el sistema son optimizados offline con base en registros históricos del tráfico. Los ejemplos más conocidos en este tipo de estrategias son SIGSET Y SIGCAP [78], las cuales operan bajo variaciones de la restricción que acota a la oferta neta de recursos por encima de la demanda de cada una de las entradas a la intersección. La principal diferencia entre los algoritmos mencionados se basa en que SIGSET procura minimizar el tiempo total de espera para una intersección con unas demandas dadas, mientras que SIGCAP maximiza la capacidad de las intersecciones.

➤ *Control coordinado de intersecciones con tiempo fijo*

Debido a su buen desempeño en condiciones de no saturación y a que no requieren de la instrumentación necesaria para medir el estado de las redes en tiempo real (lo cual se ve reflejado directamente en sus bajos costos de implementación), estas estrategias son las más utilizadas alrededor del mundo [79]. Dentro de este tipo de estrategias se encuentran ejemplos como MAXBAND

y UTCS que procuran maximizar el ancho de banda de avenidas principales, y TRANSYT que implementa un algoritmo evolutivo de optimización por gradiente sobre un indicador de desempeño determinado (e.g., el número total de paradas de los vehículos). Cabe resaltar que es la estrategia MAXBAND la que introduce el concepto de las denominadas olas de verde, en la que se busca maximizar el número total de vehículos que pueden viajar a través de una vía principal a determinada velocidad sin parar en ninguno de los semáforos dispuestos a lo largo de ésta.

4.3.2. Estrategias de control sensible al tráfico

A diferencia de los casos expuestos anteriormente, las estrategias de control sensibles al tráfico ejecutan su lógica de actuación con base en mediciones de tráfico realizadas en tiempo real, en las entradas a las intersecciones. Es claro que para llevar a cabo estas mediciones es necesario contar con algún tipo de detectores de tráfico, que pueden variar desde los usuales bucles inductivos [75] hasta tecnologías más sofisticadas de manejo de señales de video, entre otras. Al igual que en el caso de las estrategias de control con tiempos fijos, cabe hacer la diferenciación con base en el tipo de aproximación en términos de la interacción entre las intersecciones.

➤ Control sensible al tráfico de intersecciones aisladas

Entre las estrategias más relevantes dentro de esta categoría se encuentra el denominado “Método de Intervalo de Vehículos” y su versión evolucionada, MOVA. En general, ambas estrategias son procesos iterativos que incrementan el tiempo asignado de verde para cada señal con base en una condición observada en un período de tiempo determinado. La principal diferencia entre ambos algoritmos radica en que el primero incrementa el tiempo de verde cada vez que se detecta un vehículo dentro de un intervalo crítico (IC) de tiempo recalculado en cada iteración; mientras que el segundo realiza, con una periodicidad

determinada, un análisis de costos y beneficios sobre la decisión de cambiar de fase en la iteración actual o en la siguiente.

Una ventaja importante de MOVA sobre su predecesor es el hecho de que, bajo condiciones no saturadas, el procedimiento resulta en la optimización de los retardos o paradas, mientras que en condiciones saturadas procura maximizar la capacidad [75]. Igualmente, la flexibilidad obtenida sobre la definición de la función de costos y beneficios ha incentivado el desarrollo de esta estrategia incluso para ser implementada en ambientes con prioridad para autobuses, como se documenta en [80].

➤ *Control sensible al tráfico de intersecciones coordinadas*

Además de la diferenciación efectuada entre las estrategias de control coordinado de intersecciones de tiempo fijo y aquellas sensibles al tráfico, es necesario hacer una distinción con base en la distribución de la inteligencia del algoritmo. En el caso de las estrategias centralizadas, la información recopilada por el sistema de sensores es enviada a un centro de control de tráfico urbano, donde es procesada para calcular los tiempos óptimos; estos tiempos son entonces enviados a cada controlador de semáforos. Algunos ejemplos de estas estrategias son SCOOT, SCATS, RHODES, MOTION y TUC, entre otras. En contraposición, dentro de las estrategias descentralizadas (i.e., donde la inteligencia de control se encuentra distribuida a través de la red) se tienen algoritmos como UTOPIA, PRODYN y OPAC, entre otras [74].

Dentro de la categoría general de control sensible al tráfico de intersecciones coordinadas se encuentran SCOOT y los “métodos de optimización basados en modelos”. La primera es considerada una versión de TRANSYT sensible al tráfico debido a que, a pesar de compartir una filosofía similar (procurando minimizar la suma de las colas promedio en el área a través de un proceso iterativo de optimización por gradiente), SCOOT toma como entrada adicional los datos reales

de los volúmenes de tráfico en el sistema y no los datos históricos [81]. En cambio, los métodos de optimización basados en modelos (entre los que se cuentan algoritmos conocidos como OPAC, PRODYN, CRONOS y RHODES) llevan a cabo un acercamiento mucho más riguroso (y costoso en términos de tiempo de cálculo) al problema de encontrar el tiempo óptimo para el cambio de estado.

5. CASO DE ESTUDIO CIUDAD DE BUCARAMANGA

Una vez se ha hecho la caracterización de la operación y funcionamiento de las intersecciones diamante y de su versión mejorada, la intersección divergente diamante, se procede a realizar el proceso de aplicación de estas dos tipologías viales para un caso específico de la ciudad de Bucaramanga (Colombia), con lo que se pretende analizar su comportamiento y el grado de impacto que tiene esta solución en comparación con otras propuestas de diseño que se plantearan para la intersección que resulto escogida durante el proceso de selección.

A continuación se hace una descripción de la situación actual de la movilidad de la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana de la cual hace parte, ya que el hecho de pertenecer a esta configuración geográfica y urbana, es lo que hace característico su comportamiento.

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MOVILIDAD DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

5.1.1. Población

El área metropolitana de Bucaramanga está conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón, según datos del DANE la composición poblacional de estos municipios es la siguiente:

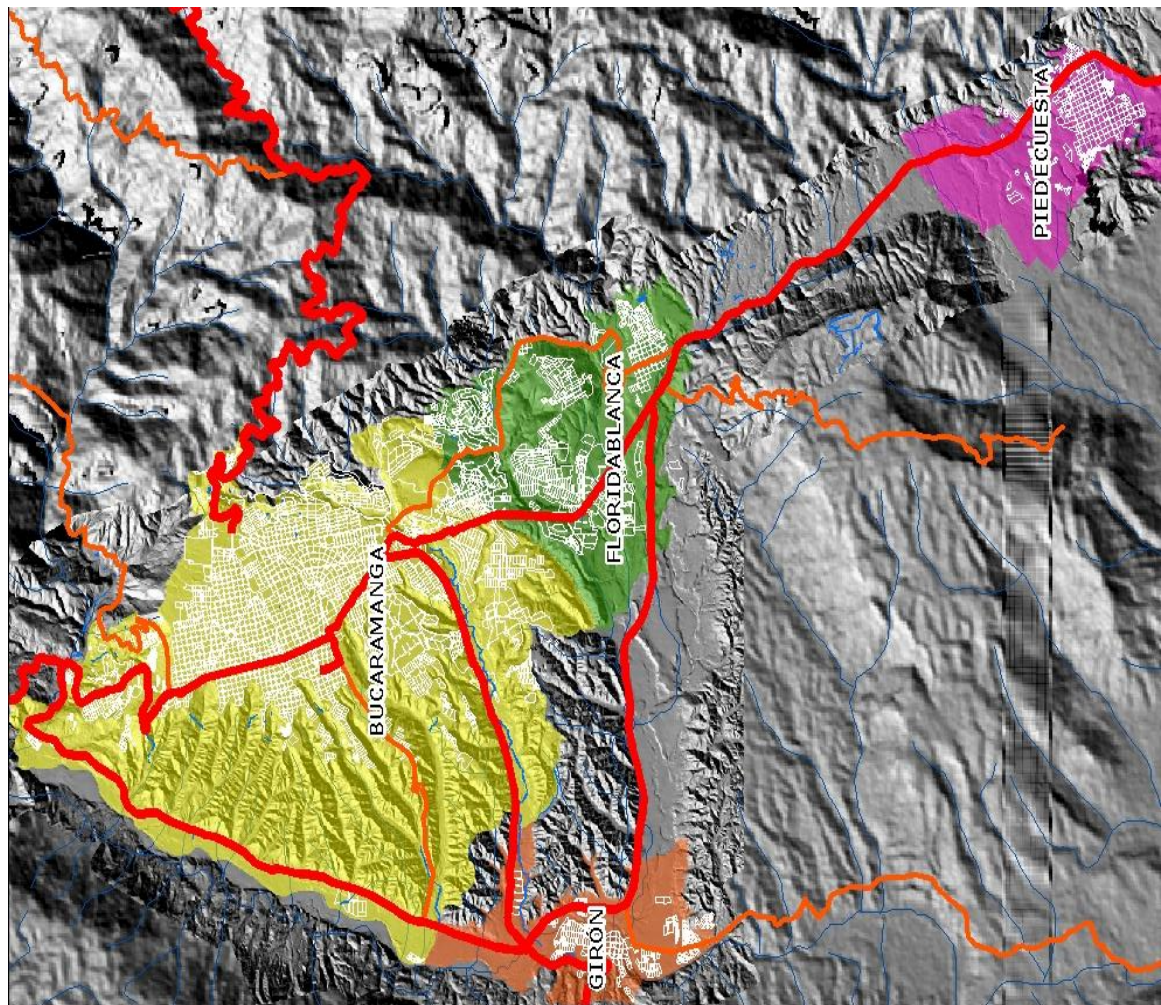
Tabla 18. Proyecciones población área metropolitana de Bucaramanga

Municipio	1993	2000	2005	2010
Bucaramanga	456,906	495,739	509,217	517,283
Floridablanca	188,810	232,706	243,859	250,982

Girón	74,338	98,639	117,941	138,861
Piedecuesta	60,107	78,769	92,734	106,960
Total general	780,161	905,853	963,751	1,014,086

Fuente: DANE 2005

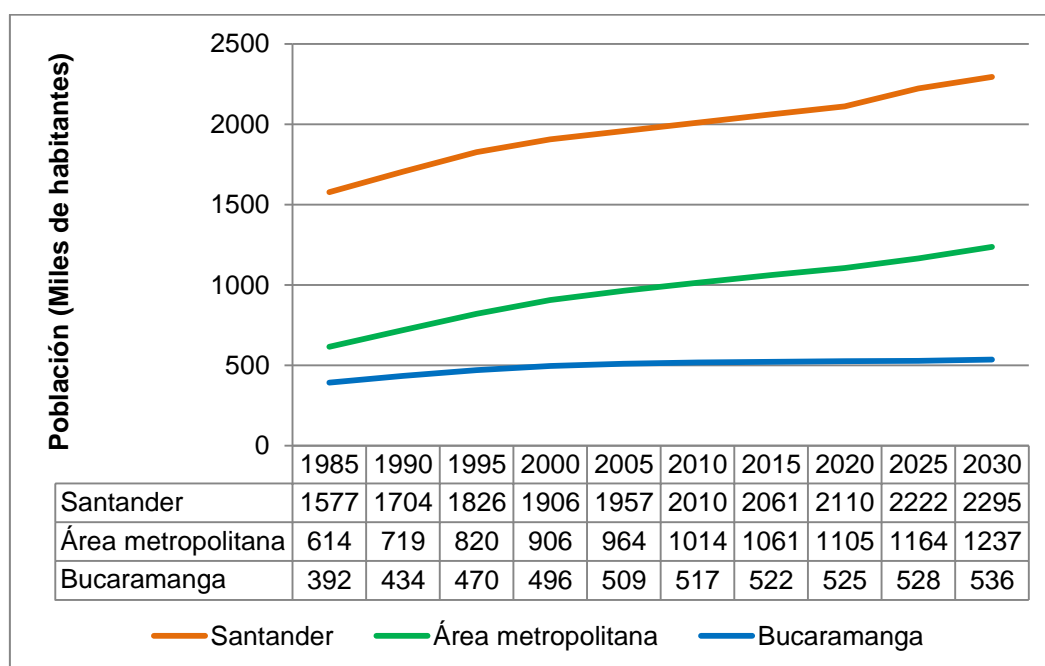
Figura 56. Área metropolitana de Bucaramanga



Fuente: Elaboración propia

Se constituye en el conglomerado urbano comercial, industrial y financiero más sobresaliente del nororiente colombiano (provincia de Soto), con una población equivalente a 51% del total del departamento de Santander. En la siguiente figura se muestra una comparación de la tendencia del crecimiento poblacional de la ciudad de Bucaramanga con respecto al área metropolitana y el departamento de Santander

Figura 57. Distribución y crecimiento de la población urbana de Santander y el área metropolitana



Fuente: Plan maestro de movilidad Bucaramanga 2010 – 2030

Al realizar una revisión de las tasas de crecimiento poblacional, se encuentra que el número de habitantes por municipio ha venido aumentando; sin embargo el caso de Bucaramanga es particular, ya que es el único municipio en el área metropolitana cuya tasa de crecimiento intercensal incrementa en el periodo intercensal de 1993 y 2005, y, por el contrario, encuentra que para los demás municipios se disminuye significativamente (especialmente en Floridablanca, que pasa de 3,31% a 1,72%). A su vez, se observa que para el área metropolitana

decrece en menor proporción (de 2,75% a 2,56), como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 19. Tasas de crecimiento poblacional

Año	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta	Total AMB
1985-1993	1,82%	3,31%	5,20%	4,64%	2,75%
1993-2005	2,02%	1,72%	4,97%	4,48%	2,56%

Fuente: Plan maestro de movilidad Bucaramanga 2010 – 2030

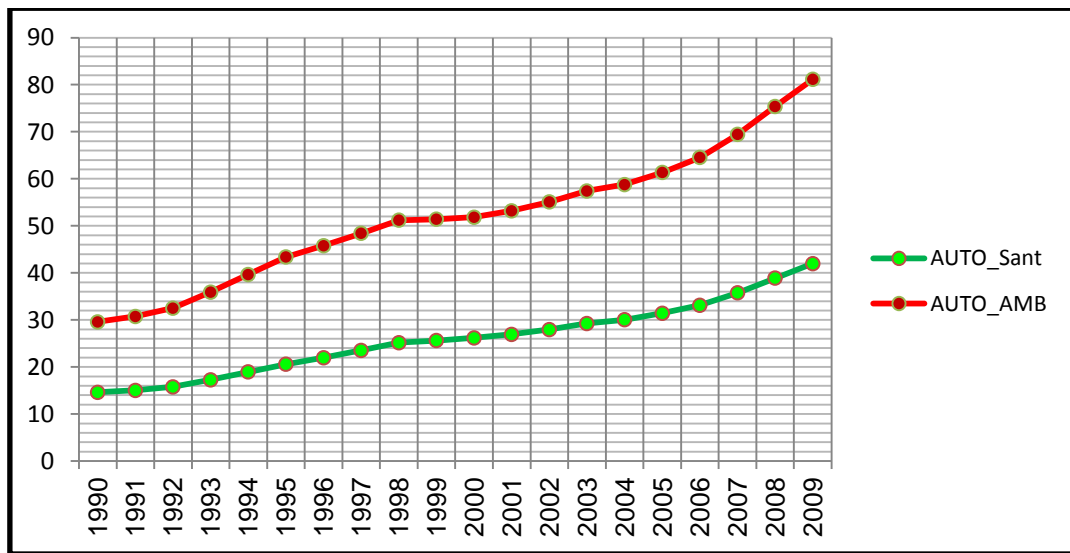
Esto indica que, tanto en el contexto municipal como en el área metropolitana de Bucaramanga, se han presentado cambios en las tasas de crecimientos, con algunas disminuciones y otros movimientos menores que no han sido significativos, pero que se deben tener en cuenta en el análisis para determinar los cambios de la ciudad y su entorno. A pesar de esto, se espera que el crecimiento de la población, principalmente para los municipios como Floridablanca, Piedecuesta y Girón, se incremente significativamente para los siguientes años [83]; esto como consecuencia de la escasez de suelo disponible para construir y habitar en el municipio de Bucaramanga. La expansión poblacional que se experimenta en el Área Metropolitana, especialmente en los municipios de Girón y Piedecuesta, promete una tendencia de densificación que seguramente mantendrá su ritmo en el tiempo y que hará homogénea la población en todo el territorio de Bucaramanga y su área.

5.1.2. Tasas de motorización

La tendencia del nivel de motorización en Santander y en el área metropolitana de Bucaramanga ha presentado un comportamiento muy similar en el transcurso de los últimos 20 años. Como se observa en la siguiente figura, el incremento en el número de carros en los dos escenarios tiene semejanzas en su trazo histórico, y

mantienen un alza considerable a medida que pasan los años y que la población aumenta, aunque el crecimiento poblacional es menor al del parque automotor, es decir, la tasa de crecimiento de vehículos en el área metropolitana se está incrementando con mayor velocidad que las tasas de crecimiento de la población.

Figura 58. Nivel de motorización de automóviles para el área metropolitana y el departamento de Santander 1990 - 2009



Fuente: Datos tomados del Ministerio de Transporte.

En la siguiente tabla se muestra la evolución de la tasa de motorización en el área metropolitana de Bucaramanga, donde se puede ver el comportamiento mencionado anteriormente.

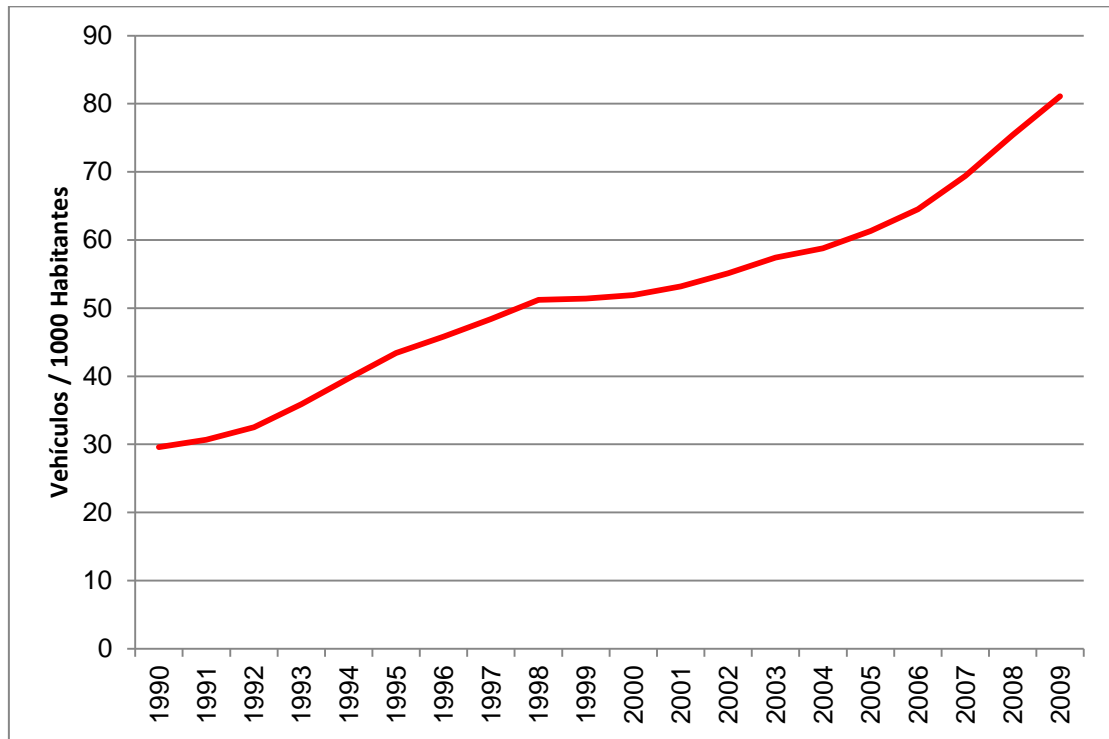
Tabla 20. Nivel de motorización automóviles

AÑO	Población AMB	AMB	
		TOTAL AUTOMÓVIL	Veh_1000hab
1990	842.704	24.936	29,6
1991	847.545	26.050	30,7
1992	852.385	27.708	32,5

AÑO	Población AMB	AMB	
		TOTAL AUTOMÓVIL	Veh_1000hab
1993	857.226	30.781	35,9
1994	862.066	34.183	39,7
1995	866.907	37.602	43,4
1996	886.141	40.575	45,8
1997	905.375	43.827	48,4
1998	924.609	47.324	51,2
1999	943.843	48.507	51,4
2000	963.077	49.939	51,9
2001	971.032	51.666	53,2
2002	978.987	53.910	55,1
2003	986.942	56.677	57,4
2004	994.897	58.503	58,8
2005	1'002.852	61.515	61,3
2006	1'010.807	65.226	64,5
2007	1'018.762	70.732	69,4
2008	1'026.717	77.386	75,4
2009	1'034.672	83.962	81,1

Fuente: Datos tomados del DANE, Ministerio de Transporte y Cámara de Comercio.

Figura 59. Tasa de motorización vehículos 1990 - 2009



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tabla 20.

Otro factor importante en la motorización de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana es el crecimiento excesivo que ha tenido el parque automotor de las motocicletas, esto es un fenómeno que no es exclusivo del área metropolitana de Bucaramanga, haciendo un recorrido en el ámbito nacional, según el Cuarto Estudio Sociodemográfico de usuarios de motos en Colombia [84], se tiene que para 2008 había 2'600.000 motos en todo el país, y que 71%, aproximadamente, se ubicaban en las ciudades pequeñas o medianas del territorio. A su vez, la compra y el uso de la motocicleta se atribuye inicialmente a la necesidad de aumentar los ingresos per cápita de la población (trabajar en mensajería, transporte de alimentos, etc.) y, en segundo lugar, a la de transportarse a sus lugares de trabajo y/o de estudio, entre otros.

Se puede observar en la figura 60 que la cantidad motorizada en el Departamento ha tenido un comportamiento superior al del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Entre la tendencia que ha seguido se encuentra que en el periodo 1998-2003, luego de un aumento del nivel de motorización de años anteriores, se mantuvo relativamente estable y hasta finales de 2009 se ha venido experimentando un alza en la cantidad de motos en el departamento de Santander. Por su parte, el número de motos por cada mil personas en el AMB se ha ido incrementando en una medida de menor magnitud, con una tendencia un poco más visible en los últimos años, como se muestra en los datos consignados en la tabla 21.

Figura 60. Nivel de motorización de motocicletas para el área metropolitana y el departamento de Santander 1990 - 2009

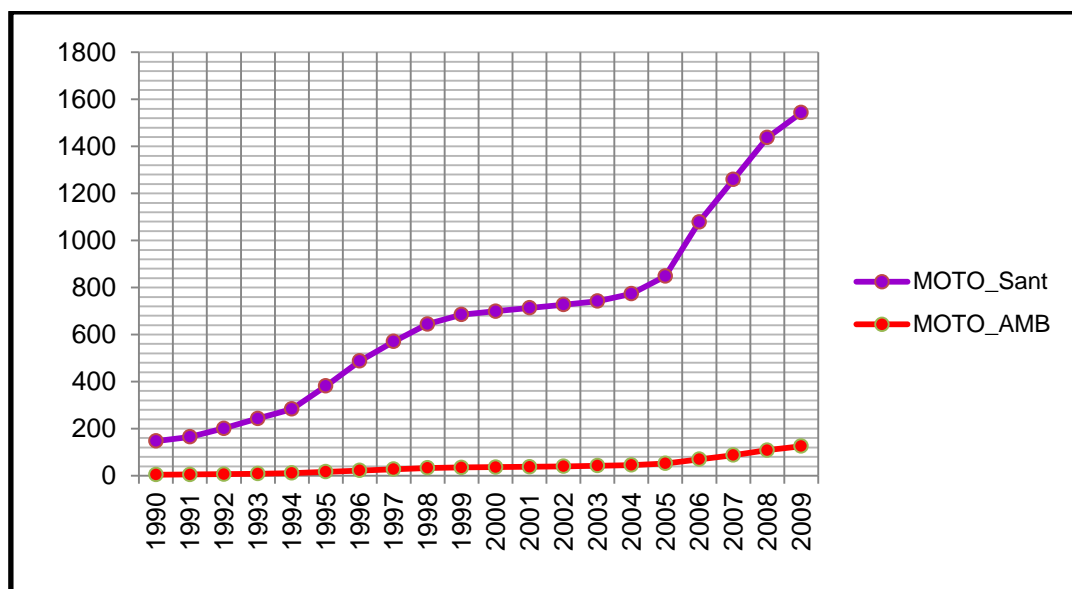


Tabla 21. Nivel de motorización motocicletas

AÑO	Población AMB	AMB	
		Total Motocicleta	Mot_1000hab
1997	905.375	25.006	27,6
1998	924.609	30.497	33,0
1999	943.843	33.230	35,2

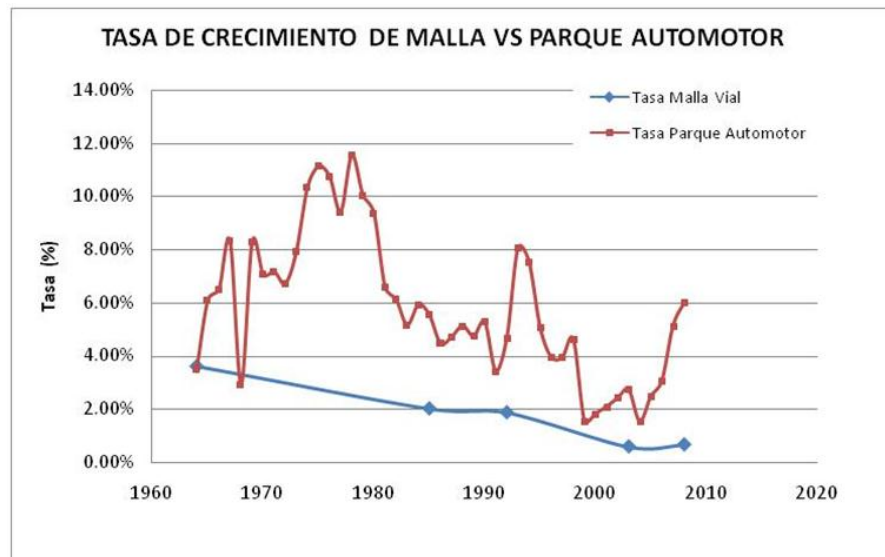
AÑO	Población AMB	AMB	
		Total Motocicleta	Mot_1000ha b
2000	963.077	34.918	36,3
2001	971.032	36.864	38,0
2002	978.987	39.178	40,0
2003	986.942	42.075	42,6
2004	994.897	45.238	45,5
2005	1'002.852	52.157	52,0
2006	1'010.807	70.382	69,6
2007	1'018.762	89.064	87,4
2008	1'026.717	111.239	108,3
2009	1'034.672	129.582	125,2

Fuente: Datos tomados del DANE, Ministerio de Transporte y Cámara de Comercio.

5.1.3. Tendencias de los viajes

Al revisar como es el comportamiento de los viajes motorizados y no motorizados en el área metropolitana de Bucaramanga, se observa que el municipio de Bucaramanga funciona como polo que atrae la mayoría de viajes diarios del área metropolitana, debido a que concentra los principales equipamientos de servicios como son universidades, hospitales, bibliotecas, centros comerciales, entre otros, situación que ha venido generando el cas vehicular, justificado en el crecimiento del parque automotor circulando por la misma infraestructura vial de hace 10 años, situación que se muestra en la siguiente figura:

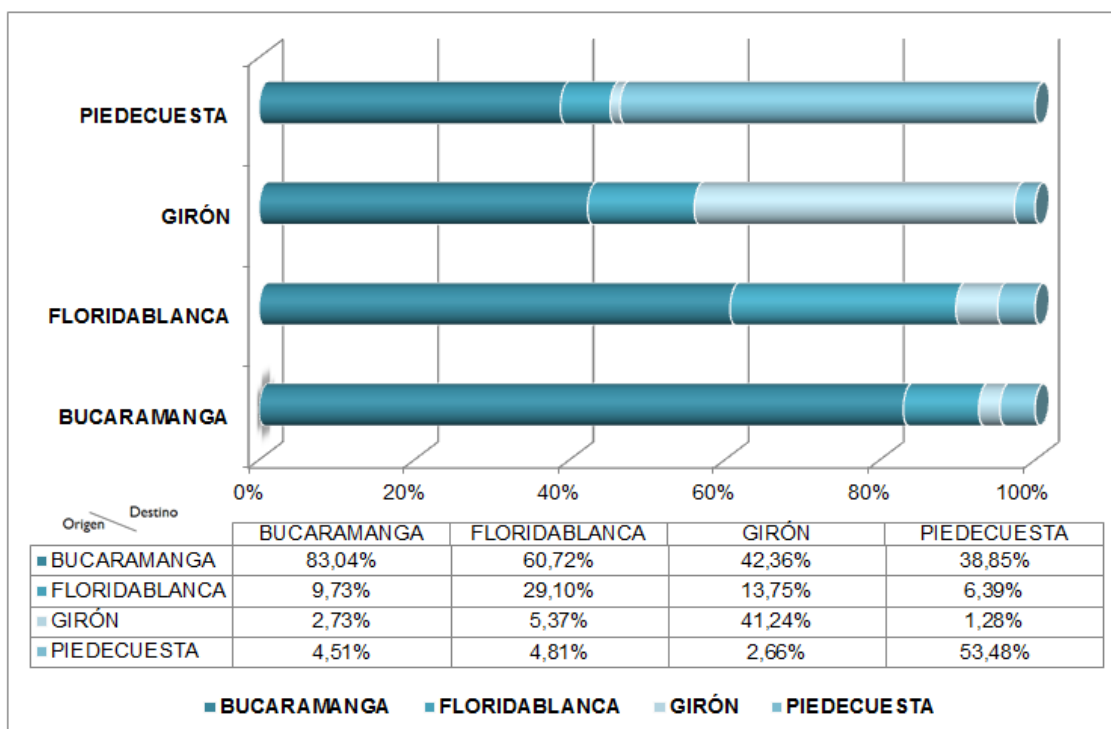
Figura 61. Tasa de crecimiento de la malla vial VS crecimiento del parque automotor



Fuente: Plan maestro de movilidad de Bucaramanga 2010 - 2030.

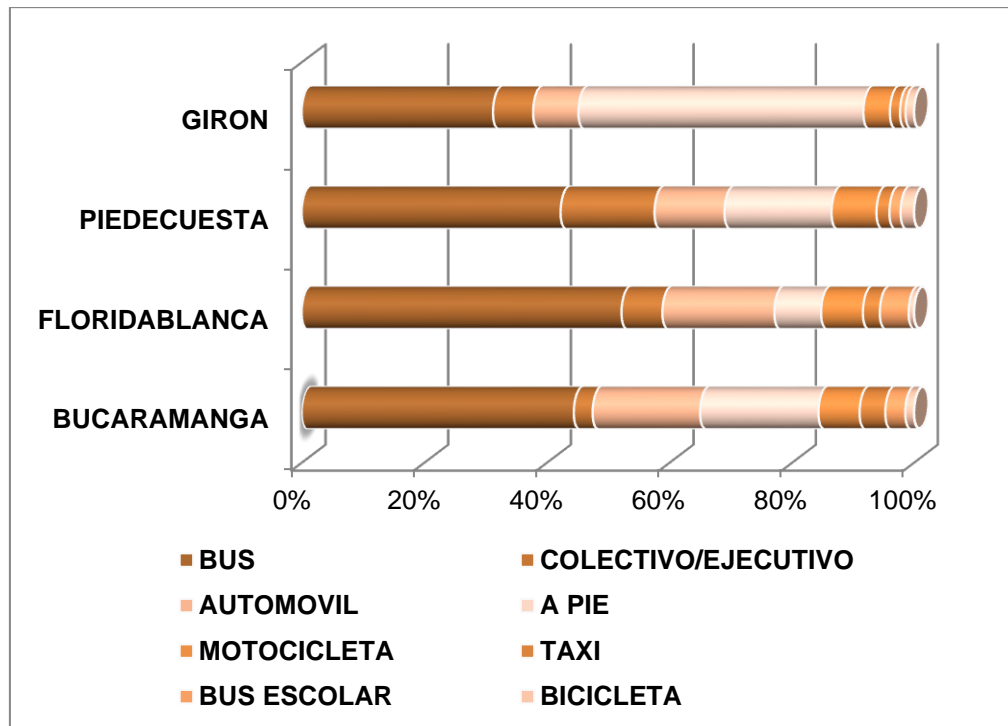
Si se observa la figura 62 se encuentra que el principal destino de los viajes es la ciudad de Bucaramanga para los viajes provenientes de Girón, Piedecuesta y Floridablanca, además los viajes internos en los municipios de Girón, Piedecuesta y Bucaramanga representan más del 40% del total de los viajes, siendo para este último el más alto con un 83%, el mayor porcentaje de viajes se obtiene en los viajes realizados entre los municipios de Girón y Piedecuesta con valores inferiores al 3%, si este mismo análisis se hace para el modo de transporte utilizado para realizar estos viajes, se obtiene lo mostrado en la figura 63, donde se puede ver que el transporte público es el medio que más porcentaje ocupa, además sobresale el alto porcentaje que se muestra para el medio a pie sobre todo en los municipios de Girón y Piedecuesta, el uso del automóvil también ocupa un porcentaje significativo sobre todo en el municipio de Bucaramanga.

Figura 62. Distribución de viajes por municipios del área metropolitana



Fuente: Plan maestro de movilidad de Bucaramanga 2010 - 2030.

Figura 63. Distribución de viajes por modo municipios del área metropolitana de Bucaramanga



Fuente: Plan maestro de movilidad de Bucaramanga 2010 - 2030.

Por último revisando la situación actual que vive la ciudad de Bucaramanga, justificada en los indicadores y valores mencionados anteriormente, se pueden identificar una serie de problemáticas asociadas a las condiciones de movilidad de la ciudad, como son:

- Hay un desequilibrio en la ocupación territorial, existen zonas con ocupación muy alta y escasez de espacio público e infraestructura vial, donde se identifica un proceso de crecimiento poblacional y de urbanización, el cual se ha combinado con un proceso de relocalización de la población, el comercio y los servicios hacia la periferia mostrando una ciudad cuyos nuevos desarrollos apuntan a un modelo de

baja densidad lo que implica la necesidad de moverse en vehículo privado.

- Existe una falta de coordinación entre las diferentes instituciones de los municipios del área metropolitana.
- Hay una baja conectividad de la red vial.
- Una parte importante de la malla vial no tiene las especificaciones de diseño adecuada para los requerimientos de la demanda de pasajeros y carga de la ciudad.

5.2. SELECCIÓN DE LA INTERSECCIÓN OBJETO DE ESTUDIO

Para la selección de los corredores y posteriormente las posibles intersecciones, se tuvo en cuenta principalmente condiciones de operación macro, como el tránsito de vehículos particulares, buses de transporte público, uso del suelo en la zona, existencia de estacionamiento autorizado o no autorizado, conflictos de accesibilidad o conectividad.

Luego las intersecciones seleccionadas se ubicaron en corredores con alta presencia de problemas de congestión y colas, principalmente generadas por la presencia de semáforos continuos en dichas intersecciones y que tuviesen más de dos fases de operación.

Otros criterios usados para la selección de las intersecciones semaforizadas fueron:

- Pendiente Longitudinal. Para este caso la pendiente longitudinal se mantuvo dentro del rango de -3 y 3%, previendo que este criterio no afectara el flujo de saturación
- Sección Transversal de las vías de acceso a la vía arterial. Con el ánimo de poseer información comparable se ha considerado el uso de un tipo de sección común, la cual se ha definido como accesos de dos carriles, en lo

posible con ancho superior o igual a 3.5 metros por carril y sección homogénea a lo largo del área dispuesta para acumulación de vehículos. Las circunstancias que llevaron a la determinación de este tipo de sección son, en primer lugar, la disponibilidad de accesos con características similares, y posteriormente la consecución de la información.

- Distribución Vehicular. Se han buscado tramos viales con baja presencia de buses y camiones, en donde la fracción de este tipo de vehículos no supere en lo posible la décima parte del volumen de la hora pico.
- Volumen Vehicular: Para la recopilación de información y posterior determinación de las condiciones de capacidad de la intersección, es indispensable tener medios - altos niveles de ocupación de los accesos de tal forma que se garantice como mínimo la presencia de 8 vehículos en cola.
- Presencia de giros izquierdos.

Cada uno de los criterios mencionados anteriormente se basó en la información recopilada durante la etapa de revisión del estado del arte, que permitió conocer las condiciones de operación de estas intersecciones en ciudades donde se han implementado (sección 3.3)

5.2.1. Selección de la intersección

Considerando los criterios de selección anteriormente descritos, se han escogido los corredores viales que tengan red semafórica, con baja presencia de vehículos pesados y transporte público, pendiente longitudinal entre -3% y 3%, características geométricas favorables.

Con base en la información recopilada durante los años 2009 y 2010 por el grupo de investigación GEOMATICA, gestión y optimización de sistemas, adscrito a la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander y del cual hace parte el investigador autor de este proyecto, esta información comprende el

inventario de caracterización de la infraestructura vial del municipio de Bucaramanga, donde se levantó información de perfiles y secciones viales de toda la malla vial de la ciudad de Bucaramanga, estado del pavimento, ubicación y estado de toda la señalización horizontal y vertical, ubicación y caracterización de las intersecciones semaforizadas, además se realizó un proceso de toma de aforos vehiculares en 84 intersecciones de la ciudad, estableciendo diferentes tipo de estaciones de aforo, las cuales fueron las siguientes:

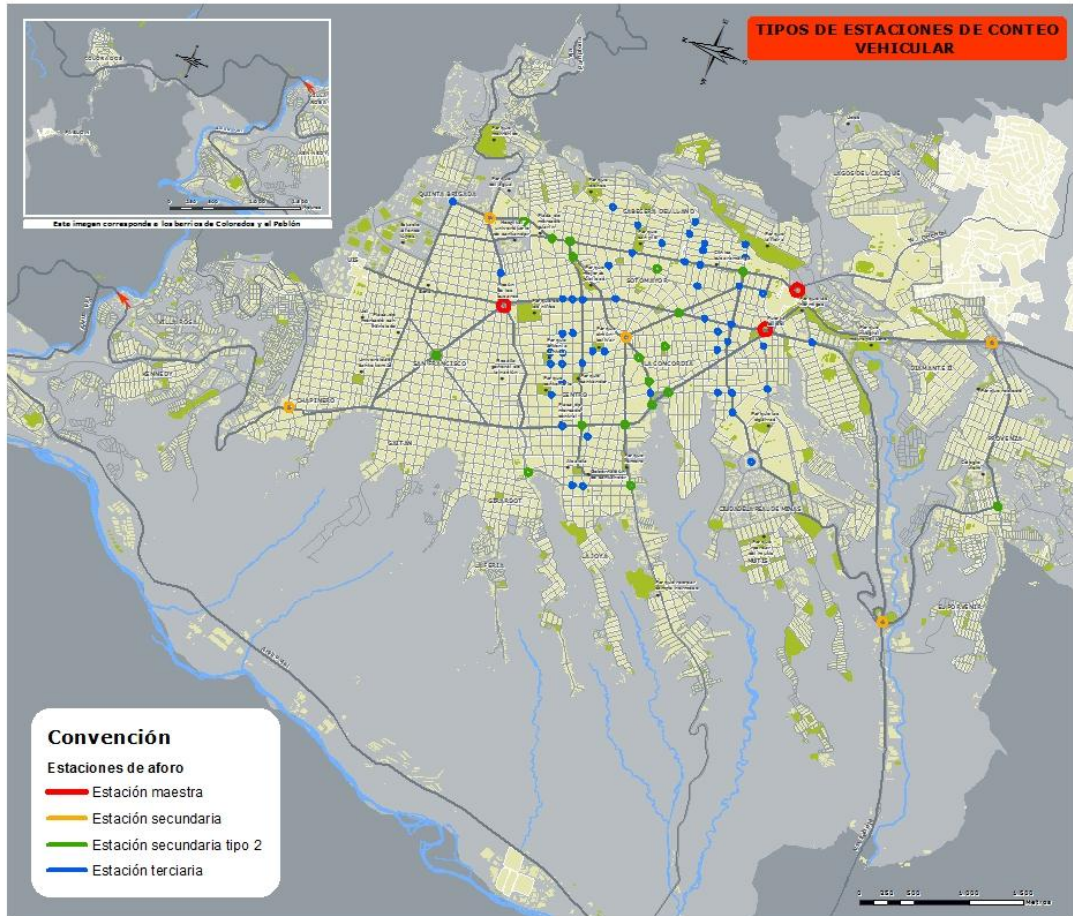
Tabla 22. Categorías de estaciones de conteo

Tipo de estación	Especificaciones	Cantidad
Estación maestra	Aforos durante 7 días por 24 horas	3
Estación secundaria	Aforos durante 3 días por 24 horas	5
Estación secundaria tipo 2	Aforos durante 3 días por 14 horas	17
Estación terciaria	Durante las horas pico de un día representativo	59
	Total	84

Fuente: Inventario de tráfico e infraestructura UIS 2009 - 2010.

En la figura 64 se muestra la especialización de las intersecciones en las que se realizó la toma de información de conteos.

Figura 64. Estaciones de aforos vehiculares



Fuente: Elaboración propia

Además de la información mencionada anteriormente, también se realizó toma de información de velocidades sobre algunos ejes vehiculares, para la determinación de las velocidades de recorrido en cada uno de los tramos de interés, se siguió la metodología establecida por el Manual de Transporte Bogotá en su capítulo 5 “*Estudios de Tránsito para Tránsito Vehicular*” [85].

La determinación de los puntos de recolección de información se realizó teniendo en cuenta aquellos corredores viales que presentan volúmenes de tráfico relativamente alto, esto se hizo con ayuda de los resultados obtenidos en los conteos vehiculares y que representan arterias vehiculares principales de la ciudad de Bucaramanga.

Los resultados que se obtuvieron para cada uno de los tramos en los que se realizó la toma de información de velocidades se muestra a continuación.

Tabla 23. Resultados de toma de velocidades

CORREDOR	INICIO	FIN	VELOCIDAD (Kph)
Calle 34	Carrera 27	Carrera 15	14.2
Calle 56 (E-W)	Carrera 33	Carrera 15	16.5
Calle 56 (W-E)	Carrera 15	Carrera 56	24.7
Carrera 13	Avda. Quebradaseca	Calle 37	12.54
Carrera 14	Avda. Quebradaseca	Calle 37	12.02
Carrera 15 N-S	Calle 45	Calle 56	11.2
Carrera 15 S-N	Calle 56	Calle 45	29.1
Carrera 21	Avda. Rosita	G. San Francisco	15.91
Carrera 27 N-S	Calle 34	Calle 56	24.3
Carrera 27 S-N	Calle 56	Calle 34	19.08
Carrera 33 N-S	Calle 34	Calle 56	21.5
Carrera 33 S-N	Calle 56	Calle 34	19.08

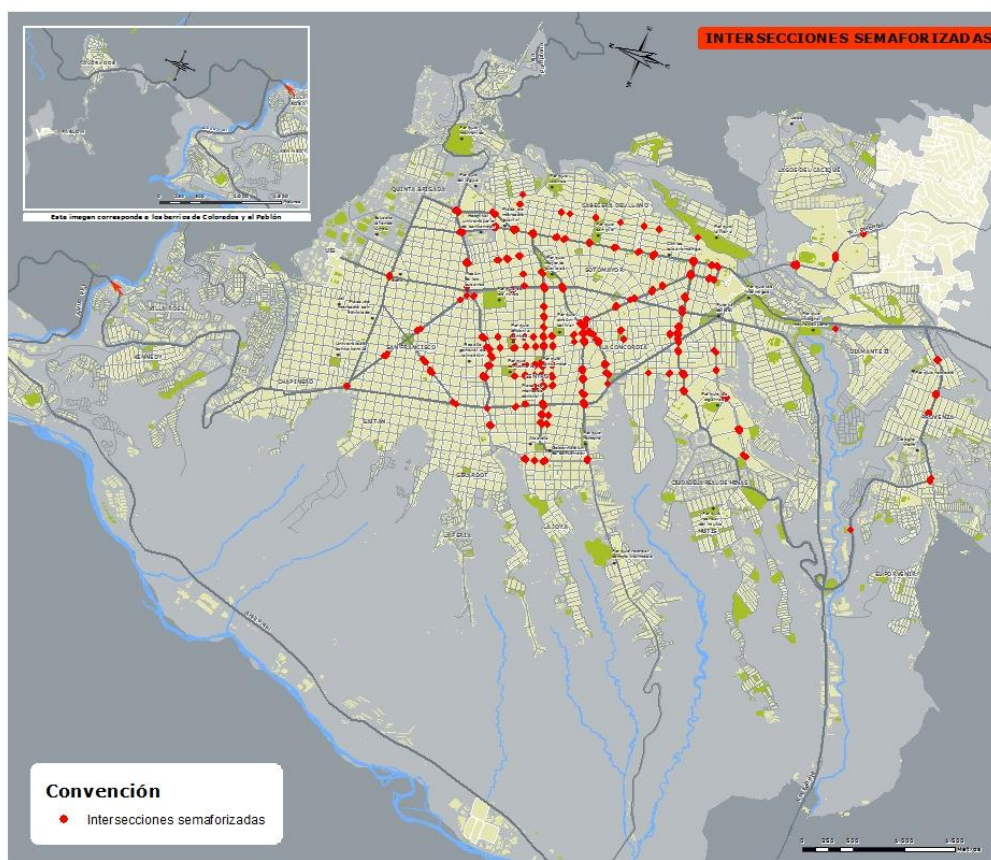
Fuente: Inventario de tráfico e infraestructura UIS 2009 - 2010.

➤ *Semaforización*

Otra información importante es la identificación de las intersecciones semaforizadas, como se mencionó anteriormente esta información también se tomó en el inventario realizado por la Universidad Industrial de Santander, en la siguiente figura se muestran las intersecciones semaforizadas.

Actualmente, la ciudad de Bucaramanga cuenta con un sistema semaforico constituido por 178 intersecciones con semáforo, que funcionan con 123 equipos de control; es decir, que existen conjuntos de dos, tres y cuatro intersecciones contiguas controladas por el mismo equipo. Del total de las intersecciones con semáforo, aproximadamente 30% se encuentra ubicado en el centro de la Ciudad, donde cumplen su función de regulación para los flujos peatonales y vehiculares; las demás se encuentran ubicadas a lo largo de la Ciudad, sobre las vías principales y, en menor proporción, sobre las vías locales.

Figura 65. Intersecciones semaforizadas



Fuente: Inventario de tráfico e infraestructura UIS 2009 - 2010.

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

Tabla 24. Ubicación de intersecciones con semáforo

DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
Carrera 14 Calles 36 y 37	2	GE
Carrera 15 Calle 21 y 22	2	MP
Carrera 15 Bulevar Santander	1	C 800

DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
Carrera 15 Avenida Quebradaseca	1	GE
Carrera 15 Calle 33	1	MP
Carrera 15 Calle 34	1	MP
Carrera 15 Calle 3	1	GE
Carrera 15 Calle 36	1	C 800
Carrera 17C Calles 55 y 56	2	GE
Carrera 15 Calle 41	1	C 800
Carrera 15 Calle 42	1	C 800
Carrera 15 Calle 45	1	C 800
Carrera 15 Calle 6	1	MP
DIAG. 15 y Carrera 17 Avenida La Rosita	2	GE
Carrera 15 Calle 15	1	MP
Carrera 17 Calles 36 y 37	2	GE
Carrera 18 Avenida Quebradaseca	1	MP
Carreras 21 y 22 Calle 31	2	MP
Carrera 18 Calles 33 y 34	2	GE
Carreras 17, 18 y 19 Calle 35	3	MR
Carrera .18 Calle 36	1	GE
Carreras 19 y 29 Avenida Quebradaseca	2	GE
Carrera 19 Calles 33 y 34	2	GE
Carreras 18 y 19 Calle 37	2	MP
Carrera 21 Calle 33	1	AU

DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
Carrera 21 Calles 34 y 35	2	GE
Carrera 21 Calles 36 y 37	2	GE
Carreras 21 y 22 Avenida La Rosita	2	GE
DIAG. 15 Calle 55	1	C 800
DIAG. 15 Calle 56	1	C 800
Carreras 21 y 22 Avenida Quebradaseca	2	GE
Carrera 22 Calle 33	1	AU
Carrera 22 Calle 34	1	AU
Carrera 22 Calle 35	1	AU
Carrera 22 Calles 36 y 37	2	GE
Carrera 30 Calle 67	1	GE
Carrera 23 Avenida La Rosita	1	MP
Carrera 27 Calles 32 y 33	2	MR
Carrera 27 Calle 34	1	GE
Carrera 27 Calle 35	1	GE
Carrera 27 Calle 36	1	GE
Carrera 27 Avenida La Rosita y Calle 41	2	GE
Carrera 27 Calle 45	1	GE
Carrera 27 Calle 48	1	GE
Carrera 27 Avenida González Valencia	1	GE
Carrera 27 Calle 54	1	GE
Carreras 27 y 28 Calle 56	2	MP

DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
Carrera 27 Calle 67	1	MP
Carrera 33 Avenida Quebradaseca	1	MP
Carrera 33 Calle 32	1	MP
Carrera 33 Calle 34	1	MP
Carrera 33 Calle 36	1	MP
Carrera 33 Calles 41 y 42	2	MR
Carrera 33 Calle 45	1	MP
Carrera 33 Calle 48	1	MP
Carrera 33 Calles 51 y 52	2	MP
Carrera 33 Calle 56	1	MP
Carrera 19 Calle 36	1	GE
Carrera 15 Calle 12	1	C 800
Carrera 18 Bulevar Santander	1	MP
Carrera 17 Calle 55	1	MP
Carrera 19 Bulevar Bolívar	1	MP
Carrera 19 Bulevar Santander	1	GE
Carrera 22 Bulevar Bolívar	1	MP
Carreras 21 y 22 Calle 41	2	MP
Carrera 27 Calle 14	1	MP
Carrera 27 Avenida Quebradaseca	1	MP
Carreras 21 y 22 Calle 50	2	MP
Carrera 33A Avenida Quebradaseca	1	GE

DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
Carrera 30 Avenida Quebradaseca	1	MP
Carrera 32 Avenida González Valencia Calle 56	1	MP
Carrera 28 Calle 34	1	MP
Carrera 28 Calle 36	1	GE
Carrera 33A Calle 32	1	MP
Carreras 15 y 17 Calle 56	2	GE
Carreras 21 y 22 Calle 56	2	GE
Carreras 35A y 36 Calle 48	2	MP
Carreras 35A y 36 Calle 45	2	MP
Carreras 27A, 28 y 29 Calle 48	3	MP
Carreras 35, 35A y 36 Calle 52	3	MP
Carreras 17 y 17C Calle 61	2	MP
Carrera 17 Calles 52 y 53	2	MP
Carrera 18 Avenida La Rosita	1	MP
Carrera 16 Calle 45	1	MP
Carrera 33 Perimetral Oriental La Flora	1	MP
Carrera 9 Calle 45	1	GE
Carrera 9 Calle 37	1	MP
Carrera 9 Calles 34 y 35	2	MP
Carrera 13 Avenida Quebradaseca	1	MP
Carrera 13 Calles 36 y 37	2	MP

DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
Carrera 15 Calle 9	1	MP
Carreras 21 y 22 Calle 45	2	GE
Carrera 33 Calles 62 y 63	2	MP
Carreras 17 y 18 Calle 45	2	MP
Carrera 36 Calle 56	1	MP
Carrera 13 Calle 45	1	GE
Carrera 27 Calles 20 y 21	2	MR
Carreras 36 y 38 Calle 34	2	MP
Carreras 35 y 36 Calles 41 y 42	4	MR
Carrera 31 Calle 52	1	GE
Carrera 21 Calle 55	1	GE
Carreras 23, 24 y 25 Calle 36	3	MR
Carrera 8 Calle 64	1	C 800
Carrera 5 Calle 64	1	GE
Carrera 25 Calle 105 (Provenza)	1	MP
Carrera 16 Calle 105 (Rocío)	1	MP
Avenida González Valencia Calles 54 y 55	2	MP
Carrera 39 Calles 32, 33 y 34	3	MR
Carreras 27A, 28 y 29 Calle 45	3	MP
Policlínica Torcoroma Calle 64	1	MP
Avenida González Valencia Calles 62 y 63	2	MR
Carreras 35A y 36 Calle 51	2	MR

DIRECCIÓN	TIPO	EQUIPO
Avenida González Valencia Calle 50	1	MP
Transversal Oriental de Caldas	1	MR
Transversal Oriental Santa Bárbara	1	MP
Carreras 22 y 23 Calle 105 (Provenza)	2	MP
Carrera 27 Calles 16 y 17	2	MP
Avenida 89 autopista Bucaramanga - Floridablanca	1	-
Circunvalar Oriente Lagos Cacique	1	-
Avenida los Búcaros Calle 61	1	-
Carrera 30 Calle 32	1	-
Carrera 30 Calle 33	1	-
Carrera 30 Calle 34	1	-

Fuente: Dirección de tránsito de Bucaramanga

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 25. 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
		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

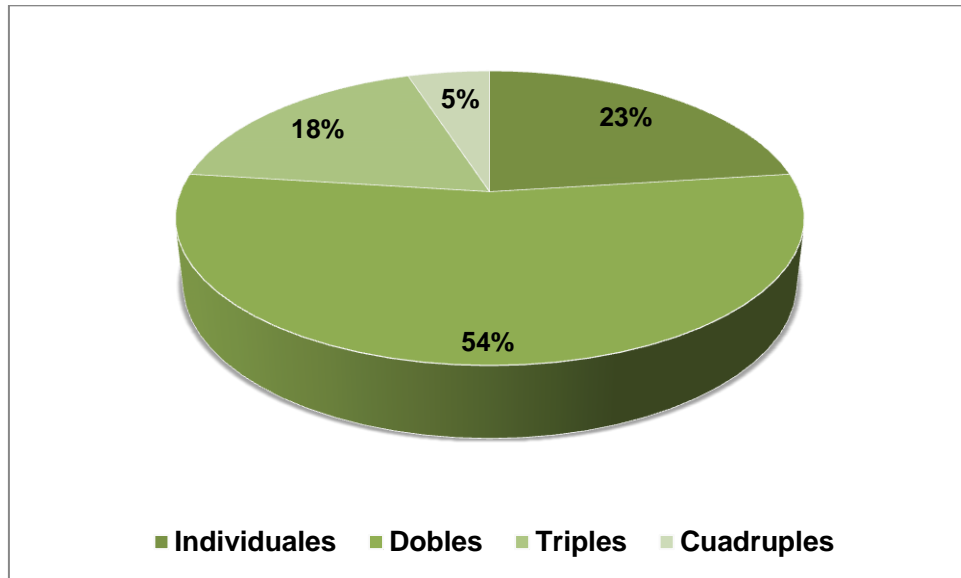
Fuente: Dirección de Tránsito de Bucaramanga.

Adicionalmente en el sistema semafórico de la ciudad, se presentan intersecciones dobles, triples y cuádruples, esto significa que hay grupos de 2, 3 y 4 intersecciones que son programadas con el mismo equipo de control. La ventaja de esta modalidad consiste en el ahorro del número de equipos por instalar, sin embargo son más las desventajas, ya que, al tener un grupo de intersecciones programadas con el mismo equipo, no se permite la implementación de ciclos semafóricos independientes como tampoco el desfase entre intersecciones, esto influye directamente en la continuidad de los flujos, ya que no se facilita la programación de olas de verde, esto impacta directamente en la movilidad de los corredores.

Adicionalmente, esta agrupación de intersecciones resulta inadecuada cuando se presentan bajas de energía o pérdida de cableado, ya que al estar programadas por el mismo equipo, las intersecciones en grupo salen de servicio, y quedan en falla, esto igualmente afecta considerablemente la movilidad de la ciudad. En la

ciudad se presentan en tan solo 23% intersecciones individuales, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 66. Intersecciones controladas por el mismo equipo



Fuente: Dirección de Tránsito de Bucaramanga.

Además como se mencionó en los criterios de selección de la intersección, se escogerán aquellas intersecciones que presentan más de dos fase semafóricas y en la red de semaforización de la ciudad de Bucaramanga esas intersecciones son:

Tabla 26. Intersecciones con más de dos fases semafóricas

Intersecciones con más de dos fases semafóricas
Carrera 27 con calle 56
Carrera 33 con calle 56
Avenida Rosita con calle 45 (Siete Bocas)
Carrera 27 con avenida Quebradaseca (Mesón de los Búcaros)
Calle 36 con carrera 33

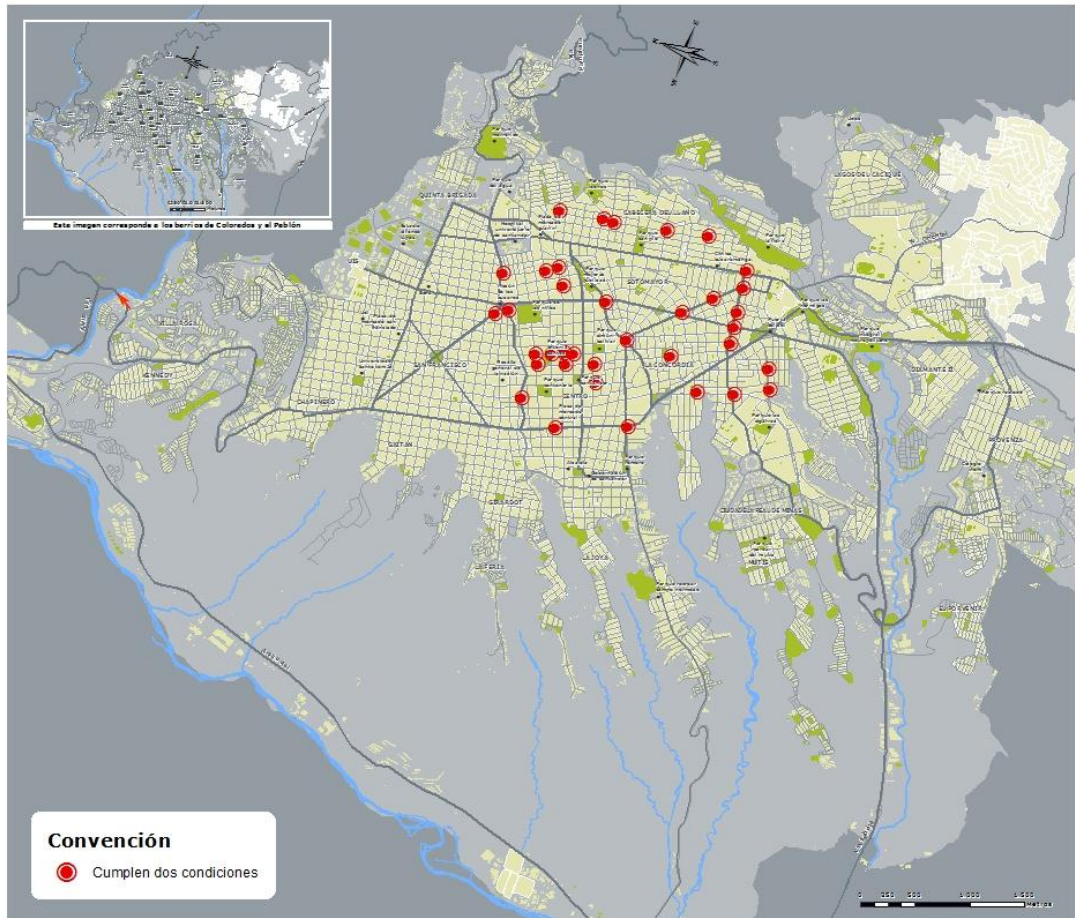
Carrera 33a con avenida Quebradaseca
Carrera 9 con calle 45
Diagonal 15 con calle 45

Fuente: Elaboración propia.

➤ *Proceso de selección*

De la red de 178 intersecciones con semáforos, en primer lugar se revisó cuales intersecciones contaban con accesos de dos carriles y ancho entre 6.8 y 7 metros de este ejercicio se detectó un total de 72 intersecciones viables para el análisis, paralelamente se verificó cuales intersecciones contaban con accesos de bajo o nulo transporte público y por ende una baja presencia de vehículos pesados, encontrándose un total de 89 intersecciones posibilitadas en este sentido. Como primera parte se encontró que al combinar los dos grupos de intersección se llega a un total de 36 intersecciones que cumplen con la condición de dos carriles y la baja presencia de vehículos pesados y/o transporte público. Lo anteriormente descrito la ilustra en la figura 67, presenta la distribución de intersecciones de la ciudad de Bucaramanga que cumplen con las dos condiciones anteriores

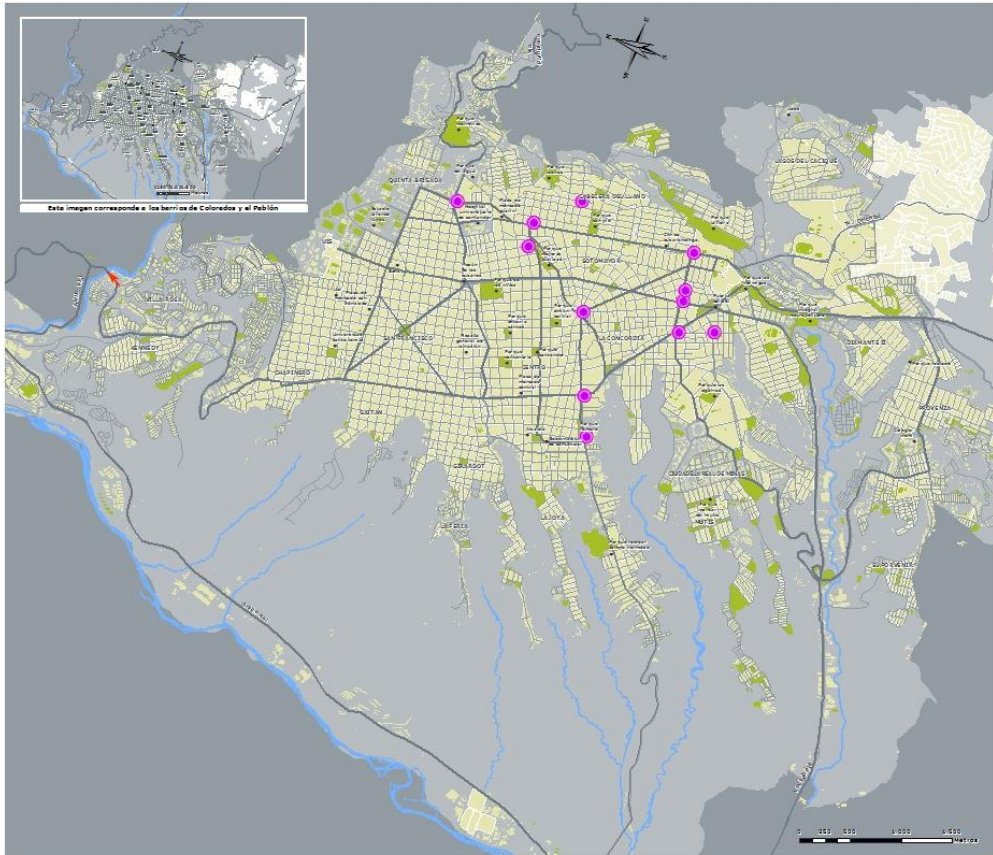
Figura 67. Intersecciones con dos carriles y bajos volúmenes de vehículos pesados



Fuente: Elaboración propia.

Como siguiente paso, para las 36 intersecciones se revisó su viabilidad dentro de la investigación descartando aquellas intersecciones cuyos accesos tienen constante estacionamiento lateral, ejercicio que permitió dar viabilidad a 12 intersecciones, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 68. Intersecciones que cumplen la condición de estacionamientos



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente de las catorce intersecciones se seleccionaron aquellas que tenían más de dos fases semafóricas, representado esto en una fase adicional para el giro izquierdo, resultando un número total de cinco intersecciones, entre las que se tienen

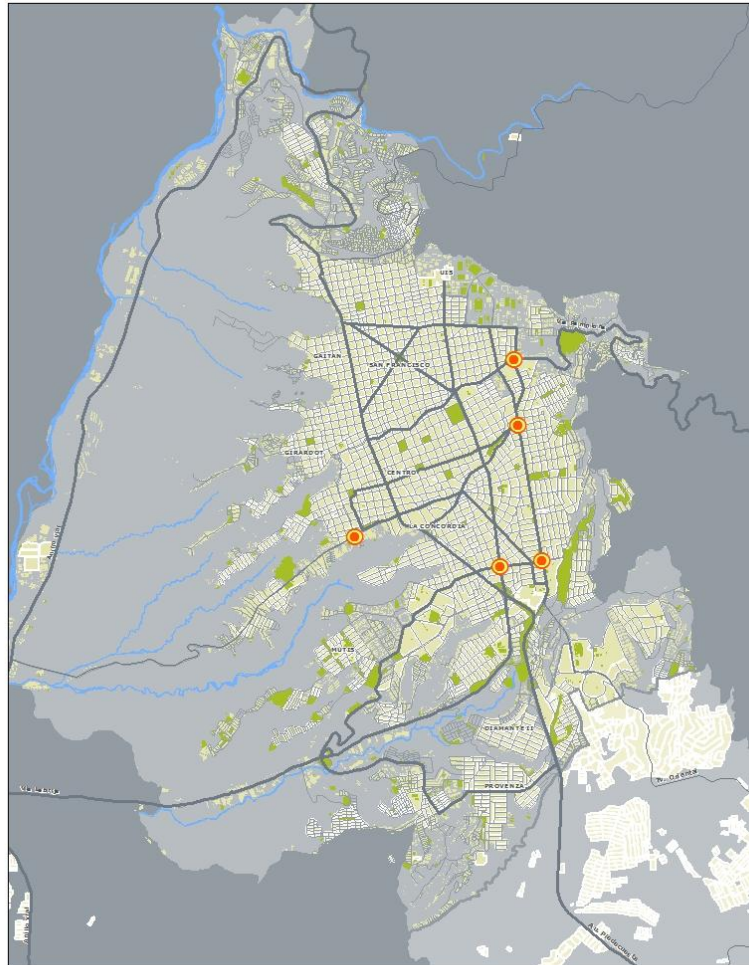
Tabla 27. Intersecciones preseleccionadas

Carrera 27 con calle 56
Carrera 33 con calle 56
Calle 36 con carrera 33
Carrera 33a con avenida Quebradaseca
Carrera 9 con calle 45

Fuente: Elaboración propia.

Sobresale que de las intersecciones finalmente seleccionadas hay dos sobre un mismo eje vial, como lo es el de la calle 56.

Figura 69. Intersecciones seleccionadas



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que este eje vial representa la única conexión directa existente en la actualidad entre el oriente y occidente del municipio y que en la actualidad presenta problemas de congestión graves durante la horas pico, se selecciona como el corredor vial perfecto para la aplicación de la solución tipo

diamante, además porque las dos intersecciones seleccionadas presentan giros izquierdos que provocan la aparición de una fase semafórica adicional.

Además la importancia de este eje radica en que es un punto importante y obligado de paso de las principales arterias de la ciudad de Bucaramanga como los son la carrera 33, carrera 27, diagonal 15 y de otras vías como los son al carrera 21 y la carrera 22, todas articulando la conexión norte – sur y sur – norte de la ciudad de Bucaramanga.

En la actualidad el eje de la calle 56 en la ciudad de Bucaramanga está comprendido entre la carrera 36 y la carrera 17, cuenta con 8 intersecciones semaforizadas, de las cuales 3 presentan ciclos de tres fases, ubicadas en los cruces con la carrera 33, carrera 27 y diagonal 15, tal como se muestra en la figura 70.

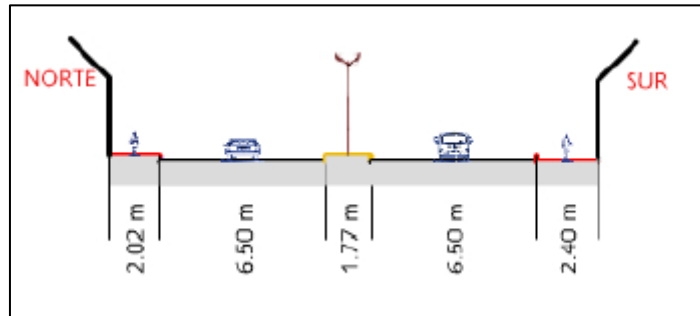
Figura 70. Ubicación de intersecciones semaforizadas sobre el eje vial de la calle 56



Fuente: Elaboración propia

La sección transversal típica se presenta a continuación:

Figura 71. Sección transversal característica eje vial de la calle 56



Fuente: <http://garza.uis.edu.co/observatoriosigbucaramanga/index.html>

Con base en todo el análisis mencionado anteriormente se opta por seleccionar la intersección de la carrera 27 con calle 56, además por representar una intersección fundamental y de paso casi que obligado en la operación vehicular de la ciudad y la conexión tanto norte – sur como oriente – occidente, a continuación se presenta un registro fotográfico de la intersección seleccionada.

Fotografía 1. Calle 56 acceso occidental



Fotografía 2. Calle 56 acceso oriental



Fotografía 3. Carrera 27 acceso norte



Fotografía 4. Carrera 27 acceso sur



5.3. SELECCIÓN DEL MODELO OPERACIONAL A USAR

Con la información descrita en el numeral “4.2 FUNDAMENTOS DE MODELOS DE OPERACIÓN” del presente documento, donde se explica cada uno de los modelos existentes para la operación semafórica y funcional de las intersecciones diamante, se procede a realizar el proceso de selección del modelo que presente las mejores opciones para su aplicación en el caso de estudio en la ciudad de Bucaramanga.

A continuación se muestra una tabla resumen con los principales parámetros necesario para su aplicación:

Tabla 28. Parámetros empleado por cada modelo

Modelo	Parámetros que tiene en cuenta
IDIRMS (Sistema integrado de intercambiador diamante y rampa)	<ul style="list-style-type: none"> * Separación entre las intersecciones * Ancho de carriles de llegada a la arteria principal * Pares OD por acceso * Longitud de ciclo (seg) * Flujo de saturación y sobresaturación * División de fases * Demoras promedio pro vehículo * Longitud de cola * Velocidad operacional promedio por acceso
Algoritmo tráfico local de respuesta	<ul style="list-style-type: none"> * Separación entre las intersecciones * Ancho de carriles de llegada a la arteria principal * Pares OD por acceso * Longitud de ciclo (seg) * Flujo de saturación y sobresaturación * División de fases * Controladores en tiempo real * Densidad de flujo
Modelo del valor umbral	<ul style="list-style-type: none"> * Ancho de carriles de llegada a la arteria principal * Pares OD por acceso * Longitud de ciclo (seg) * Tasa de Volumen / Capacidad * División de fases * Ocupación arteria principal * Densidad de flujo * Controladores en tiempo real
ICS (Modelo de la estrategia de control integrado)	<ul style="list-style-type: none"> * Separación entre las intersecciones * Pares OD por acceso * Longitud de ciclo (seg) * Flujo de saturación y sobresaturación * División de fases * Controladores en tiempo real * Tasa de Volumen / Capacidad

<p>DRIVE (Diamond interchange and ramp metering via evaluation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Separación entre las intersecciones * Ancho de carriles de llegada a la arteria principal * Pares OD por acceso * Longitud de ciclo (seg) * Flujo de saturación y sobresaturación División de fases * Demoras promedio por vehículo * Longitud de cola * Velocidad operacional promedio por acceso y arteria principal
<p>ALINEA</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Separación entre las intersecciones * Ancho de carriles de llegada a la arteria principal * Pares OD por acceso * Longitud de ciclo (seg) * Flujo de saturación y sobresaturación División de fases * Controladores en tiempo real

Fuente: Elaboración propia

Al realizar una revisión para las condiciones de operación del sector caso de estudio, se puede observar que no existen equipos de control en tiempo real, los equipos de control actuales se utilizan para la optimización de los ciclos semafóricos de acuerdo con la demanda existente y la prioridad de los flujos vehiculares, según la importancia y uso de las vías, pero tienen una programación fija, según el momento del día, los cambios en su programación se realizan desde una central de control principal, lo que implica un retraso en el establecimiento de las nuevas condiciones operacionales ante un determinado suceso, por lo cual el concepto de tiempo real no puede ser manejado.

Esto permite descartar el uso de dos modelos como son el algoritmo de tráfico local de respuesta, el modelo del valor umbra, el modelo ICS y el modelo ALINEA. Los métodos restantes manejan parámetros muy similares, por lo cual se podría usar cualquiera, para el caso de esta investigación se aplicaran los dos métodos

operacionales, IDIRMS y DRIVE, con lo cual se busca generar el mayor conocimiento posible y análisis sobre el impacto que generara la implementación de este tipo de intersecciones para las condiciones operacionales de una ciudad colombiana. A continuación se muestra de forma más detallada los parámetros funcionales para estos dos métodos.

Tabla 29. Parámetros de comportamiento vehicular

IDIRMS	DRIVE
Parámetros relacionados a Aceleración	
Max. Aceleración, V, D Max. Desaceleración, V, D Desaceleración Normal, V,D	Max. Aceleración, V, F Max. Desaceleración, V, F
Parámetros relacionados a la Velocidad Deseada	
Velocidad deseada, V, D Velocidad límite, R, F Aceptación de velocidad, V, D	Max. Velocidad, V, F Velocidad límite, R, F Control de Velocidad, R/V, F Agresividad, G, D Sensibilidad, G, D
Parámetros relacionados a Seguimiento Vehicular	
Brecha Mínima, V, D Tiempo de Reacción, G, F	Intervalo Objetivo, G/R, F Tiempo de Reacción, G, F Brecha Mínima, G, F Agresividad, G, D Sensibilidad, G, D
Parámetros relacionados a Aceptación de brecha	
Tiempo de Reacción, G, F Max. Tiempo de espera, V, D	Tiempo de Reacción, G, F Agresividad, G, D Paciencia, G, D
Parámetros relacionados a Cambio de Pista	
Distancia Zona 1, R, F Distancia Zona 2, R, F Max. Tiempo de espera, V, D Porcentaje de Adelantamiento, G, F Porcentaje de Recuperación, G, F	SignPosting, R, F Equivocación de pista, G, F Agresividad, G, D Sensibilidad, G, D
Parámetros relacionados a Elección de ruta	
Aceptación de guía, V, D Función de costo generalizado, R/V, F	Familiaridad, V, F Función de costo generalizado, R/V, F Factor de Costo, R, F Factor de Perturbación de Costo, V, F
Notación <Nombre de parámetro>, <alcance>, <valor>	
Alcance	Valor
G - Global V - Por tipo de Vehículo R - Por arco	D - Distribución F - Fijo (constante)

Fuente: Elaboración propia

5.4. PROCESO DE MICROSIMULACIÓN

Los simuladores de la operación de las redes viales urbanas son potencialmente útiles para analizar estrategias de control y realizar predicciones de comportamiento operacional de la red vial frente a distintos eventos o situaciones. Así, los modelos de simulación permiten otorgar una visión amplia de las complejidades de operación de una red frente a problemas específicos y a implementar posibles soluciones con rapidez y con la confianza de que las medidas tomadas tengan un impacto positivo.

En efecto, los modelos de simulación permiten crear una suerte de laboratorio en el computador, en el cual se representa la operación de la red vial bajo análisis y así experimentar nuevas estrategias o técnicas de gestión sin los impactos que significaría su implementación real.

Es por ello que la aplicación de los tres modelos seleccionados se hará con ayuda de un software de microsimulación como lo es TransModeler 2.0 de la línea CALIPER C.O. La justificación en la selección de este software es la disponibilidad con la que se cuenta en el grupo de investigación y en la universidad de la licencia actualizada de este software, además es un potente y versátil paquete de simulación, aplicable a una amplia gama de tareas de planeamiento y modelamiento de tráfico.

TransModeler puede simular toda clase de redes de viales, desde autopistas hasta calles de los centros de las ciudades, y puede analizar redes multimodales de áreas extensas con gran detalle y fidelidad. Se puede simular el comportamiento de sistemas de tráfico complejos para ilustrar la circulación de tráfico, la operación semafórica, y el funcionamiento conjunto de la red, permite determinar los recorridos de los vehículos aplicando asignación dinámica de tráfico a tablas de origen y destino de viajes. Los tiempos de viaje por períodos y por segmento de

red pueden corresponder a datos de entrada de información externa o desarrollada, ejecutando asignación y simulación de tráfico.

Y lo más importante para el caso de aplicación de esta investigación es que TransModeler simula un amplio espectro de señales de control de tráfico, como son:

- Simula sistemas semafóricos comunes, incluyendo tiempos fijos o control actuado por la demanda.
- Simula sistemas semafóricos más complejos incluyendo sistemas coordinados y sistemas coordinados actuados en relación a la demanda.
- Evalúa requerimientos de señales y genera planes semafóricos actuados basados en tablas de volúmenes de movimientos de giro.
- Aplica plantillas adecuadas al usuario para crear controles semafóricos actuados en lugar de conceptos basados en anillos y barreras o diagramas de grupos de fases.

Es necesario mencionar brevemente los pasos necesarios para el establecimiento del modelo de microsimulación, dichos pasos son:

- Preparación de la información de entrada.
- Chequeo de Errores.
- Información de salida.
- Procedimiento de calibración y validación.

➤ *Información de entrada*

La información de entrada puede ser dividida en dos grandes grupos [86]:

- **Información estática.** Este tipo de información se refiere a las características físicas y técnicas de la red. Ejemplo de esto son el número de carriles, ancho de

carriles, uso de carriles, el control de mecanismo de las intersecciones, ubicación y geometría de las mismas.

- **Información dinámica.** Esta información se refiere a la demanda de tráfico representada por proporción de virajes o una matriz de origen – destino y clasificada por tipo de vehículo. La programación de la red de semáforos también es clasificada como una información dinámica.

En la siguiente tabla se presenta un listado no exhaustivo de la información requerida para la modelación de una simulación microscópica de tráfico.

Tabla 30. Requerimientos mínimos de datos de entrada

Categoría	Parámetro	Comentario
Información para la codificación de la red	Longitud de arco	Chequear la longitud de los carriles de giro, pendiente y ancho de cada carril
	Número de carriles	
	Operación de intersección	Chequear configuración de los carriles y movimientos prohibidos
	Reparto de señales	Chequear ciclo, fases, distribución de verde y desfases. Para señales actuadas verificar valores máximos y mínimos de verdes, ubicación de los detectores y configuraciones
	Velocidad de arco	Medida ininterrumpida de tiempos de viaje; utiliza velocidad espacial
Información de demanda	Matriz OD	Obtener de modelos externos
	Flujos por arco y porcentajes de virajes	Chequear el flujo por movimiento y la composición vehicular

Fuente: AUSTRROADS RESEARCH REPORT (2006)

➤ *Chequeo de errores*

Es importante asegurarse que la geometría física de un dispositivo vial (intersección, camino, autopista) sea adecuadamente representada en el modelo. Una vez que la red es construida, es importante realizar una corrida visual para chequear que los vehículos se mueven de manera correcta por la red. Cuando la

geometría no es correcta, los vehículos realizan giros indebidos y la velocidad se reduce. Debido al freno de los vehículos, las ondas de choque pueden ocurrir. Esto lleva a la interrupción del flujo, y la generación de vehículos en las zonas cercanas se verá afectada.

➤ *Proceso de calibración*

En el desarrollo de cualquier modelo de tráfico, incluyendo un modelo de microsimulación, el modelo necesita ser ajustado para un determinado propósito. La calibración es el proceso de modificar y cambiar los valores de los parámetros de un modelo en orden de ajustar los resultados de la simulación a la información observada. El objetivo de la calibración es mejorar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento del conductor y el rendimiento de determinados indicadores como los tiempos de viajes, demoras y longitudes de colas variando los valores de los parámetros de sus valores por defecto.

Después del proceso de calibración y de modelado se debe realizar la Validación puede ser definida como una comparación de la salida del modelo con la información observada, independiente del proceso de calibración. Es común que de la información recolectada una porción sea para la calibración y el resto para la validación.

Para el rendimiento de la validación comúnmente es utilizado los indicadores de tiempo de viaje en arco (segundos, minutos u hora) o el tiempo total de viaje consumido en una red (por ejemplo, en veh-h/h). Demoras o longitudes de colas pueden ser similarmente comparadas.

5.4.1. Escenarios de microsimulación

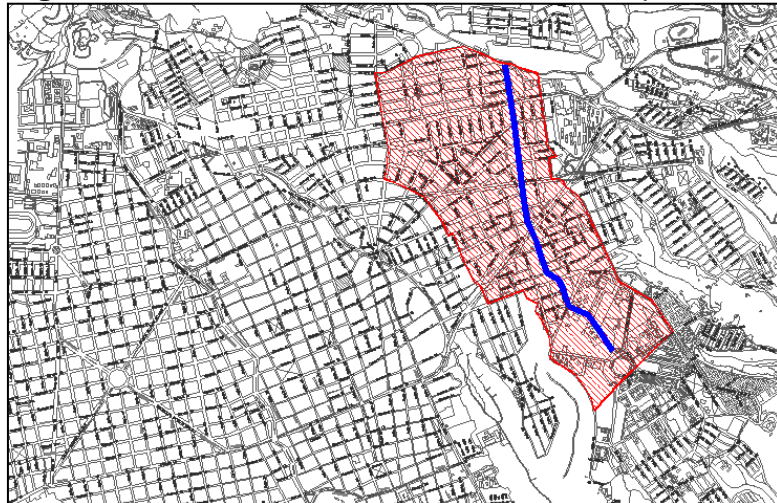
Como la finalidad de esta investigación es determinar la viabilidad operacional de la implementación de intersecciones tipo diamante en ciudades colombianas, tomando como caso de estudio una intersección de la ciudad de Bucaramanga,

resulta pertinente poder comprar la solución tipo diamante con otras alternativas de diseño planteadas, además es necesario establecer los movimientos viales de interés para cada simulación, y establecer una zona de análisis amplia, ya que cualquiera que sea el escaneo propuesto, este deberá resolver el problema de movilidad de manera zonal, es por ello que se decide construir una amplia red del sector abarcando el corredor de la calle 56 desde la carrera 36 hasta la carrera 17. Esta propuesta permitirá generar soluciones integrales al proyecto sin detenerse a efectos puntuales sobre la intersección inicialmente contemplada. A continuación se describen cada uno de los escenarios a analizar.

➤ *Escenario 1:*

Situación actual, tal y como funciona el sector en la actualidad, buscando que planteamiento sirva como una medida integral para mejorar la movilidad del sector, se ha optado por establecer una red de simulación que abarque mucho más que solo al intersección en análisis, con el fin de obtener datos de impacto de la solución en corredores viales próximos como son la carrera 22, carreras 21, diagonal 15, calle 54, carrera 33 y avenida González Valencia, a continuación se muestra la zona de influencia que se plantea.

Figura 72. Zona de influencia de la solución planteada



Fuente: Elaboración propia

En la figura 73 se muestra el montaje de la red de simulación hecho en TransModeler para este escenario

➤ *Escenario 2:*

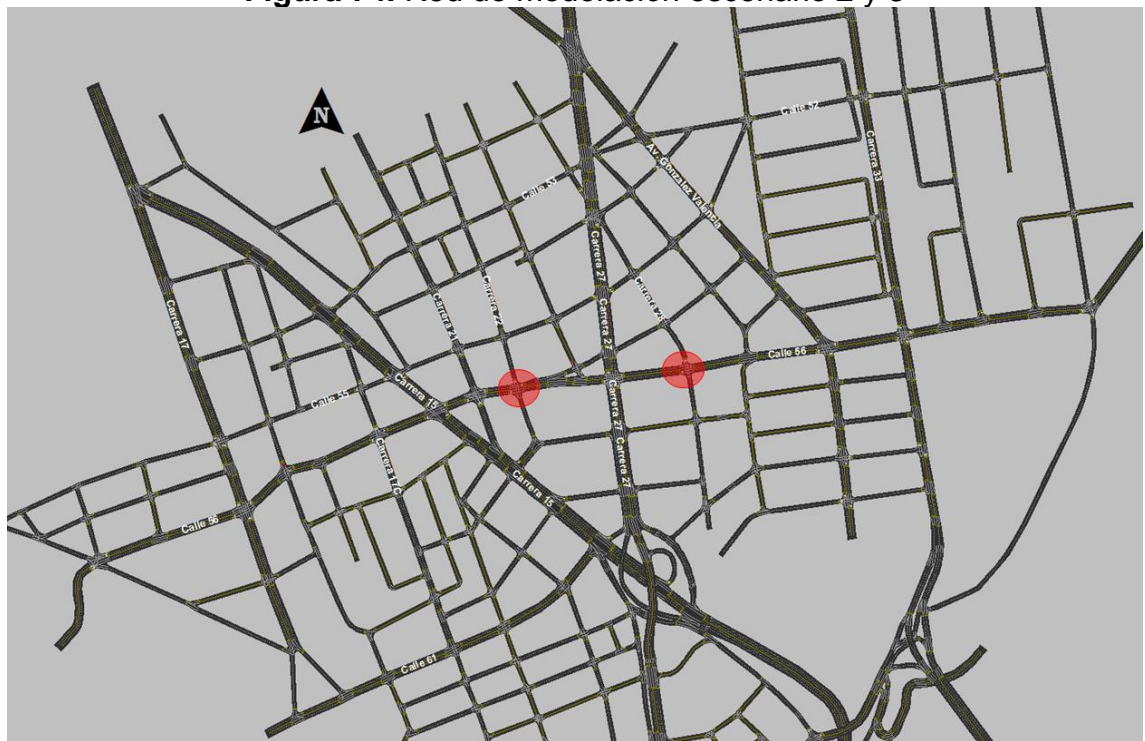
Se refiere a la solución diamante convencional, pero para esta investigación no se aplicara directamente sobre la intersección seleccionada, sino que se aplicara una intersección arriba de ella y una debajo, para de esta forma aprovechar el cambio de sentidos y eliminar la fase de giro izquierdo en la intersección de la carrera 27 con calle 56, dichas intersecciones corresponden a la carrera 28 con calle 56 y la carrera 22 con calle 56. Este escenario tendrá dos partes, una primera parte con el escenario usando el modelo de operación IDIRMS y una segunda parte usando el modelo de operación DRIVE, en la figura 74 se muestra la ubicación de dichas intersecciones en la malla de simulación.

Figura 73. Red de modelación escenario 1



Fuente: Elaboración propia

Figura 74. Red de modelación escenario 2 y 3

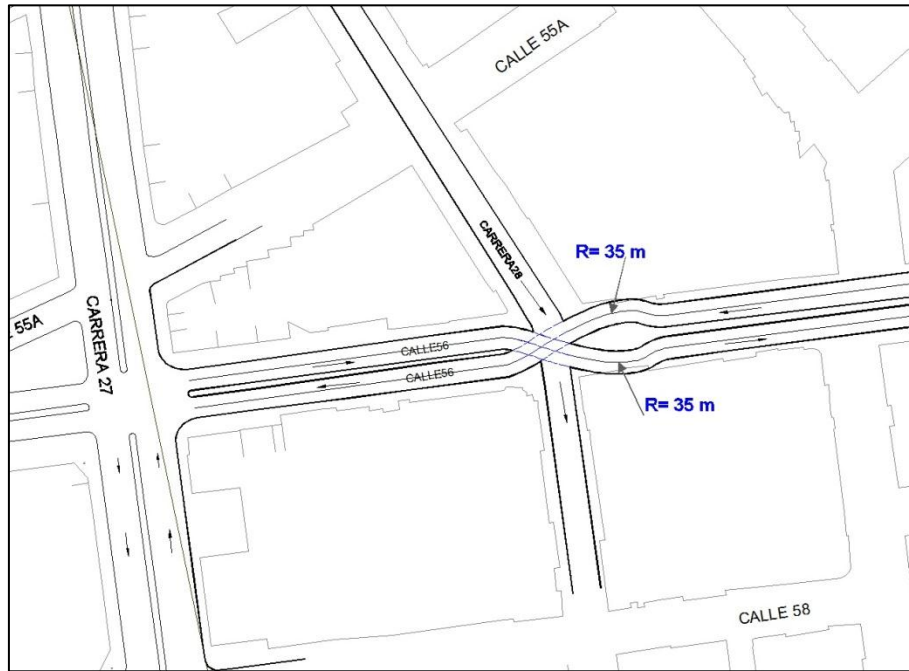


Fuente: Elaboración propia

➤ *Escenario 3:*

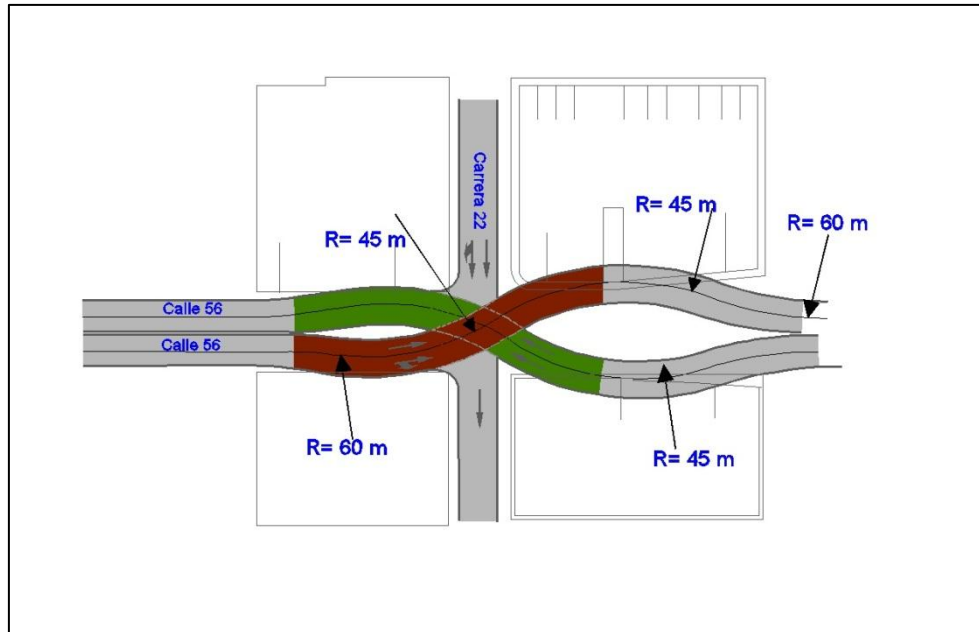
Se refiere a la solución diamante divergente, al igual que en el escenario 2 se aplicara de la carrera 28 con calle 56 y la carrera 22 con calle 56 y también tendrá dos partes, una primera parte con el escenario usando el modelo de operación IDIRMS y una segunda parte usando el modelo de operación DRIVE, en la figura 75 y 76 se muestra un esquema de la solución planteada.

Figura 75. Diseño intersección carrera 28 con calle 56



Fuente: Elaboración propia

Figura 76. Diseño intersección carrera 22 con calle 56



Fuente: Elaboración propia

➤ *Escenario 4:*

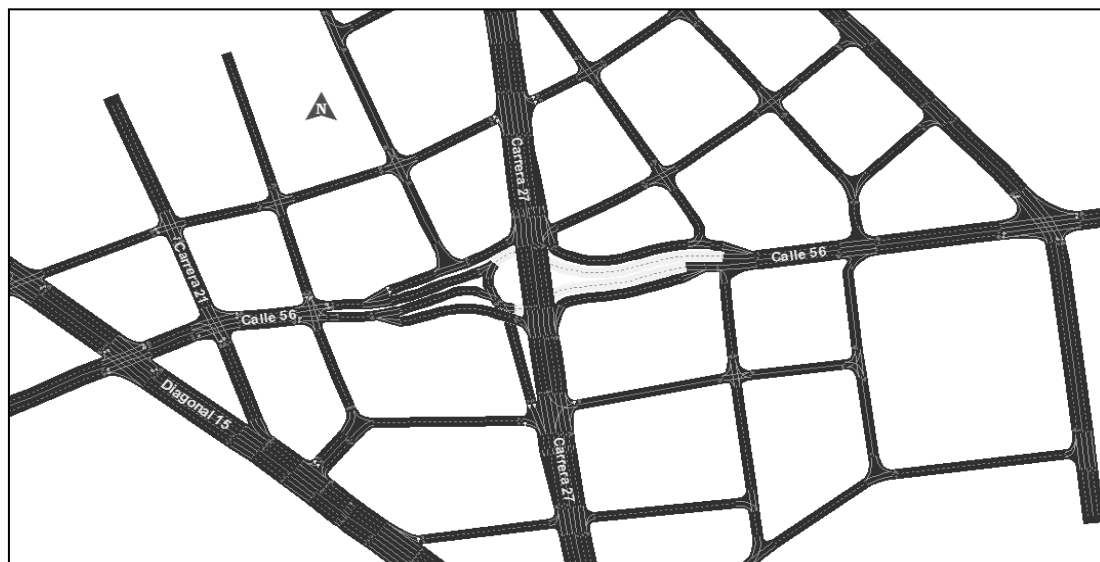
Corresponde a una solución puntual sobre la intersección de la carrera 27 con calle 56, que consiste en un intercambiador que se compone de un paso a desnivel tipo glorieta para el eje vial de la calle 56, dejando a nivel la carrera 27, permitiendo realizar todos los flujos y eliminando el semáforo existente en esta intersección, dicha solución fue propuesta en el 2007 por una entidad de la ciudad como lo es el área Metropolitana de Bucaramanga, en las siguientes figuras se muestra la configuración de dicho escenario.

Figura 77. Glorieta a desnivel



Fuente: Área Metropolitana de Bucaramanga

Figura 78. Red de modelación glorieta a desnivel



Fuente: Elaboración propia

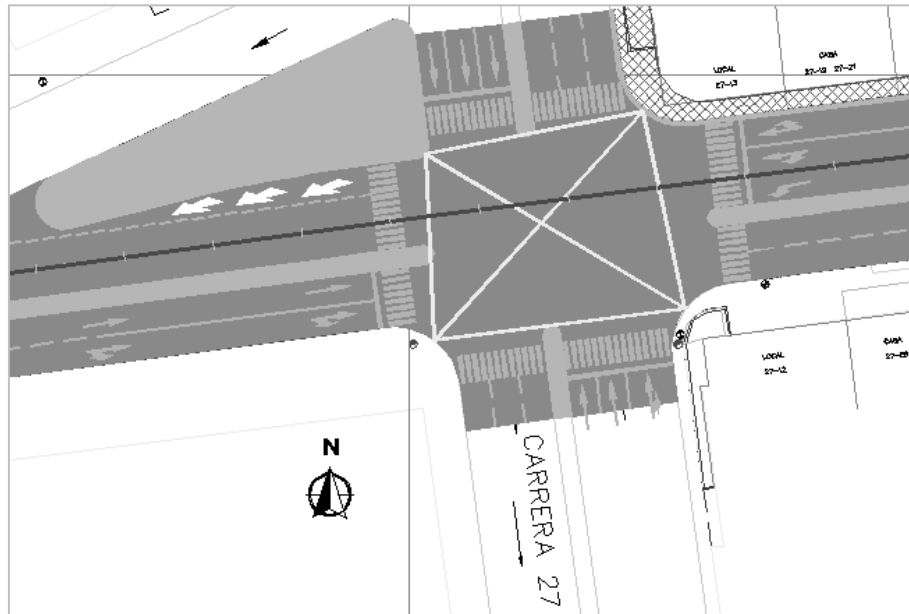
➤ *Escenario 5:*

Corresponde a una solución que implica la generación de un tercer carril adicional en el sentido oriente – occidente de la calle 56, que sirva para el giro izquierdo y de esta forma disminuir las colas que se presentan en este sector.

➤ *Escenario 6:*

Este escenario corresponde a una solución propuesta en el año 2005 por la firma consultora INTERPRO que consistía en un puente sobre esta intersección, formado por la elevación del eje vial de la calle 56.

Figura 79. Esquema tercer carril para giro izquierdo, escenario 5

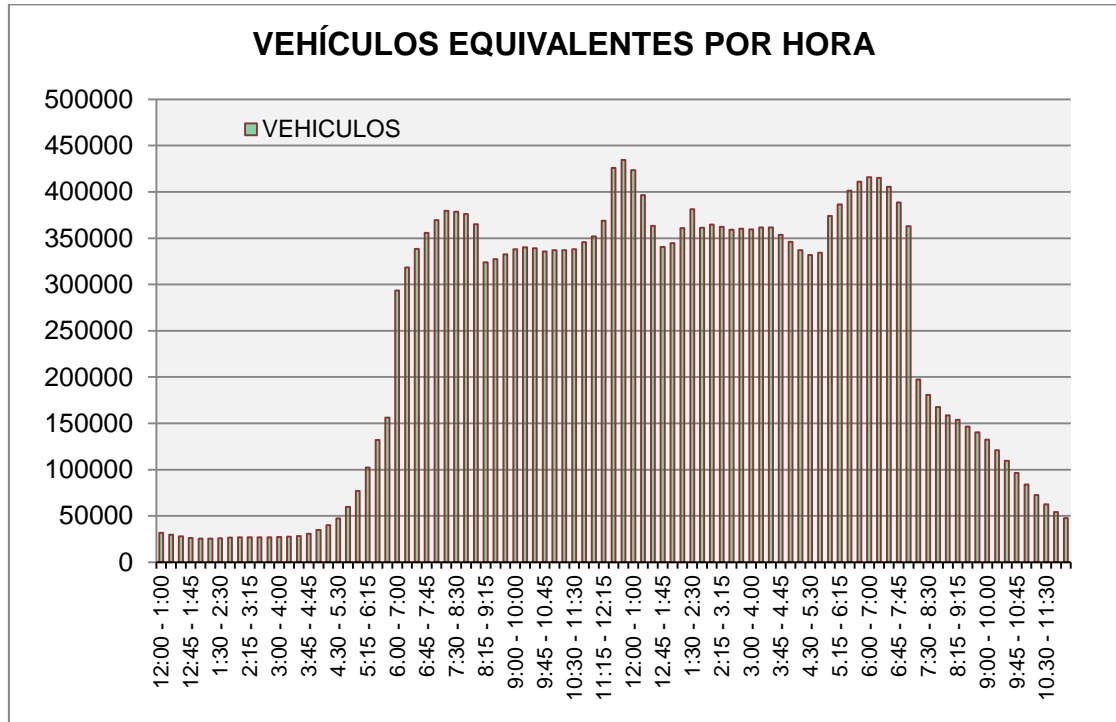


Fuente: Elaboración propia

5.4.2. Información de entrada

Este estudio se basó en los resultados arrojados por el estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander en convenio interadministrativo con la Alcaldía de Bucaramanga en 2010, que llevaba por título CARACTERIZACIÓN DE LAS VÍAS DE MEDIANO Y BAJO FLUJO VEHICULAR, IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS PARA LA MALLA VIAL VEHICULAR Y MODELAMIENTO, DIAGNÓSTICO Y ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA LA MOVILIDAD URBANA DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA [18], del cual el autor de la presente investigación hizo parte de equipo técnico que trabajó en dicho estudio, se determinaron las horas pico para diferentes sectores de la ciudad, entre ellas la zona en estudio, obteniéndose como hora pico más crítica la comprendida entre las 11:45 AM – 12:45 PM, en la siguiente figura se muestra dicho comportamiento.

Figura 80. Distribución vehicular horaria carrera 27 con calle 56



Fuente: Modelamiento para la optimización del flujo vehicular

Los flujos vehiculares para la intersección en estudio y cada una de las que se encuentran en el área de influencia se muestran a continuación.

Figura 81. Flujos vehiculares zona de influencia





Fuente: Elaboración propia

Otra información necesaria es la composición vehicular por tipo de vehículo por cada acceso, esta se muestra a continuación:

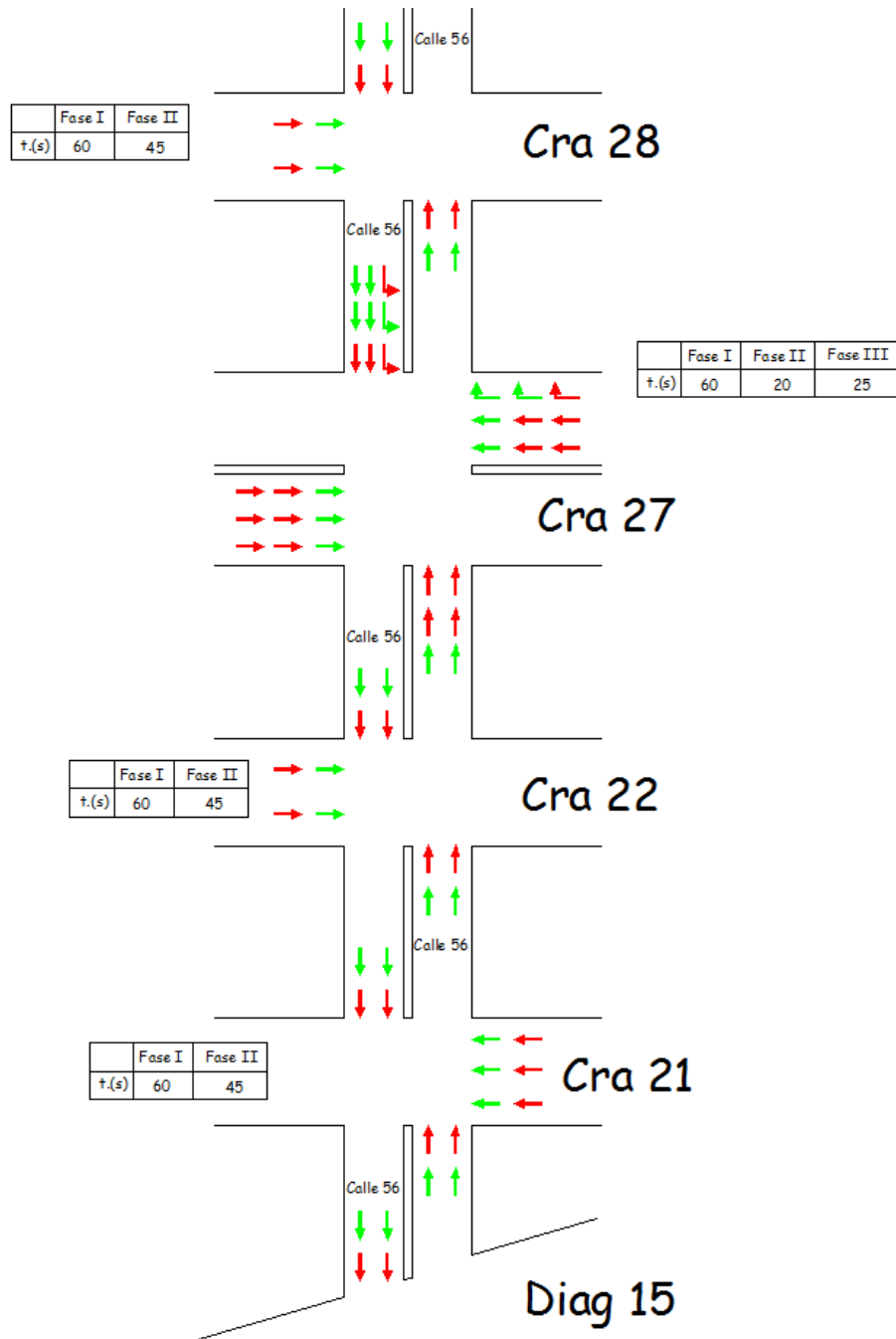
Tabla 31. Composición vehicular por acceso

Eje vial	Acceso	% Autos	% Buses	% Camiones	% Motos
Carrera 27	Norte	76,0%	4,0%	3,5%	16,5%
Carrera 27	Sur	71,4%	3,1%	2,7%	22,8%
Calle 56	Oriental	77,2%	8,6%	2,8%	11,4%
Calle 56	Occidental	71,2%	2,3%	2,1%	24,4%

Fuente: Elaboración propia

Por último el otro parámetro de entrada es la programación semafórica existente en dicho eje vial para la hora escogida en la modelación, la cual servirá para el ajuste del escenario 1 y para el proceso de calibración del modelo.

Figura 82. Fases semafóricas existentes eje vial calle 56



Fuente: Dirección de tránsito de Bucaramanga

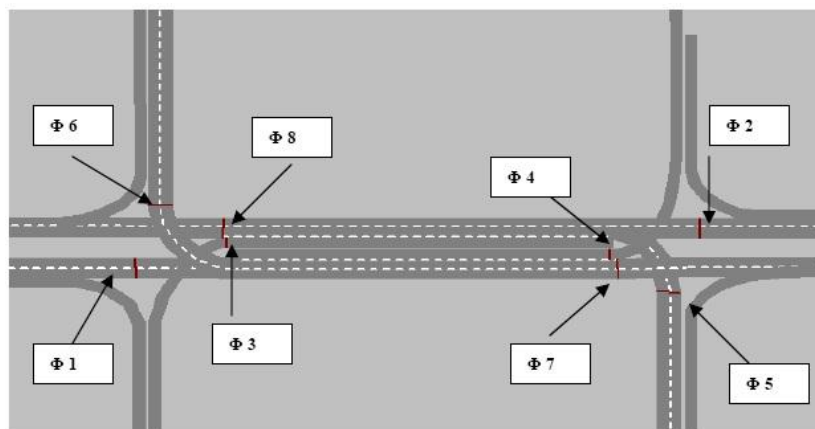
En el caso de los escenarios 2 y 3, se presenta a continuación las fases semafóricas seleccionadas a emplear para la operación de las intersecciones diamante.

Tabla 32. Tiempo semafórico escenario 2

FASE Φ	TIEMPO VERDE (Seg)
1	18 a 65
2	17 a 64
3	71 a 95
4	70 a 119
5	124 a 112
6	101 a 10
7	18 a 102
8	18 a 87

Fuente: Elaboración propia

Figura 83. Numeración de fases escenario 2



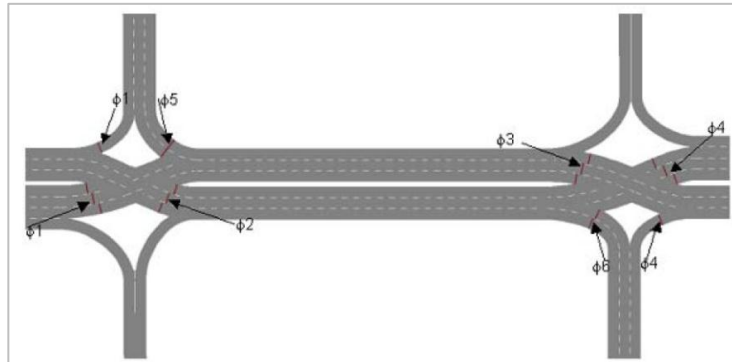
Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Fases semafóricas escenario 3

FASE Φ	TIEMPO VERDE (Seg)
1	70 a 23
2	28 a 65
3	60 a 30
4	35 a 55
5	28 a 65
6	60 a 30

Fuente: Elaboración propia

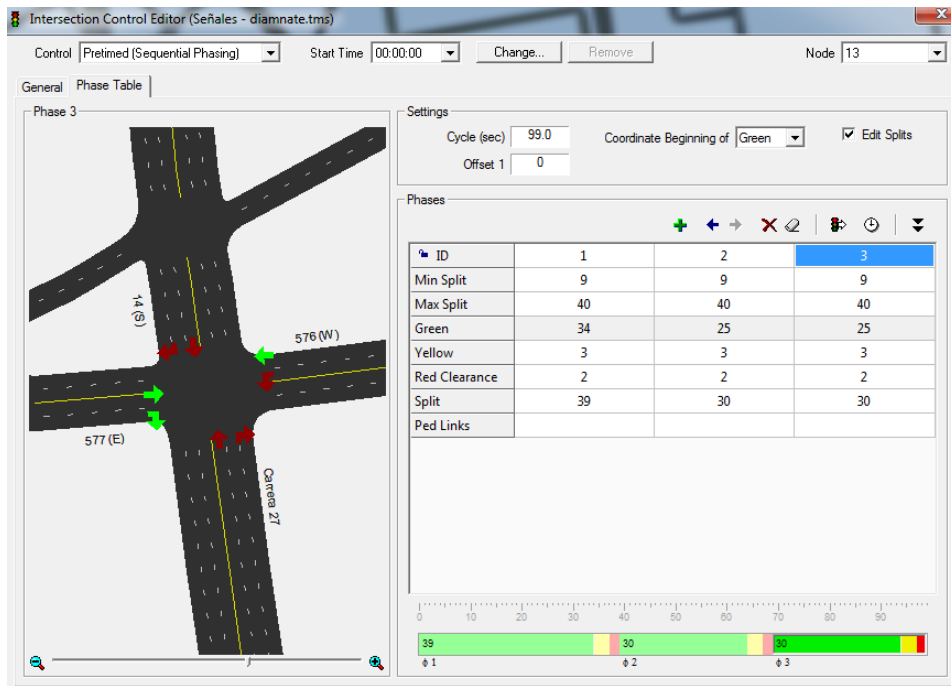
Figura 84. Numeración de fases escenario 3



Fuente: Elaboración propia

Por último a continuación se muestra una imagen de la caja de herramientas que maneja el software TransModeler para el manejo de la operación semafórica y que es el que permitirá hacer el ajuste y variación de cada modelo.

Figura 85. Herramienta en TransModeler para el manejo de la operación semafórica



Fuente: CALIPER C.O.

5.4.3. Calibración del modelo inicial

El principal objetivo de la fase de calibración es replicar de manera realista el movimiento del tráfico observado en el simulador. Los resultados reportados por los simuladores pueden ser observados de manera visual o analítica. El análisis visual consiste en observar los movimientos de los vehículos en la pantalla, en orden de corroborar que el tráfico se comporta de manera realista. El análisis cuantitativo es llevado a cabo en forma paralela, en donde el usuario requiere las salidas estadísticas del modelo para una comparación con la información observada.

Cuando la comparación entre lo observado y simulado no es satisfactoria, es necesario realizar algunos cambios en los valores de los parámetros de cada modelo. Los chequeos y cambios considerados en el proceso de calibración

se distribuyen en 4 categorías: red, demanda, configuración general de la simulación y comportamientos del conductor.

El área de análisis a considerar para el proceso de calibración está conformada

por el cuadrante de calles 56 y 54 y las Avenida González Valencia y Diagonal 15 El proceso de medición de datos para la calibración se realizó el jueves 17 de Febrero del 2011 entre las 11:45 AM y 12:45 PM.

Se hizo el ejercicio de asignación inicial, el cual utiliza una matriz semilla de viajes que relaciona los orígenes y destinos presentes en la red, entendiéndose que se cuenta con una con 16.641 combinaciones de O-D posibles, se procedió a analizar las posibles rutas de flujo vehicular que resultaran más determinantes en el desarrollo y análisis de la red.

Como se ha mencionado, el modelo entrega como salida la operación de los vehículos en la red, es decir la velocidad media, largos de cola, número de detenciones, consumo de combustible (parámetro no calibrado), entre otros. Por lo tanto se debe adoptar un criterio de calibración que replique el comportamiento observado y medido en terreno.

Se procedió a definir como indicador de rendimiento de la calibración, uno basado en el largo de cola observado en terreno, debido a que este valor engloba el comportamiento de los vehículos en la red, tanto en la descarga de semáforos como capacidad de intersecciones.

En el procedimiento de análisis se definen 2 niveles que se deben ser revisados durante la calibración:

- Nivel de Red. Básicamente corresponde a una verificación general en donde el modelo reproduzca los niveles de flujos

- Características vehiculares y comportamiento de usuarios. Tiene relación con la calibración de los parámetros por tipo de vehículos y de comportamiento de los usuarios.

En el primer nivel, también denominado calibración de la demanda, se debe verificar que los flujos simulados repliquen los niveles de flujo observados en terreno. En este proceso se involucran todos aquellos parámetros de red que influyen directamente en la elección de ruta de los usuarios. Así, se deben considerar las penalidades en los giros, la velocidad máxima en los distintos ejes, el nivel de conocimiento de los usuarios de los costos de la red y el modelo de asignación.

En el segundo nivel se calibran los parámetros vehiculares asociados a los conductores de la red con el objetivo de representar el comportamiento de cada tipo de vehículo en diferentes condiciones. A partir de diferentes estudios [88] se llega a la conclusión que el largo de cola en una intersección corresponde a la mejor variable para conseguir el objetivo de este nivel. Se considera para este segundo nivel la intersección de la carrera 22 con calle 56, en donde se miden las colas por cada acceso y carril.

Para la validación del modelo, se debe considerar un indicador no utilizado durante el proceso de calibración y que capture los dos niveles mencionados anteriormente, es decir, que sea dependiente del nivel de flujo vehicular y del comportamiento del usuario en la red. Para este proceso se considerara por lo tanto el tiempo de viaje de distintos ejes. Se realiza la medición de los tiempos de viajes mediante el método de vehículo flotante de los ejes de la calle 56 (en ambas direcciones) entre los cruces de la carrera 33 y carrera 17.

Se utiliza un modelo manual para ir determinando los valores de los parámetros durante la calibración [89]. Primero se realiza un análisis de sensibilidad de distintos parámetros de comportamiento en orden de observar que parámetros

explican de mejor manera el indicador de rendimiento y cuales logran ir disminuyendo este valor. El parámetro cuyo valor minimiza el indicador de rendimiento se fija, luego se van modificando los valores de los otros parámetros explicativos hasta lograr el mejor valor posible.

➤ *Indicadores de Rendimiento del Proceso de Calibración y Validación.*

Tabla 34. Criterios de calibración de modelos

Criterio y Mediciones (valores modelados versus observados)	Aceptación de Calibración	Comentarios / Fuente
Flujos de Arcos Individuales dentro de 100 veh/h para flujos < 700 veh/h dentro de 15% para 700 < flujos < 2700 veh/h dentro de 400 veh/h para flujos > 2700 veh/h Suma de todos los flujos por arco Estadístico GEH* < 5 para flujos por arco individual Estadístico GEH* para suma sobre flujos de arco	> 85% de casos > 85% de casos > 85% de casos precisión=5% > 85% de casos < 4	FHWA (2004)
Tiempo de Viajes para rutas seleccionadas Tiempo de Viaje Promedio Relativo a lo Observado Dentro del 15% de los Tiempos Observados (o 1 minuto si es más grande)	Dentro del 10% > 85% de casos	RTA NSW
Patrón de Congestión Inspeccionar la dispersión de colas, la distribución de la demanda por pistas, etc	Satisfacción del modelador	Distribución de pistas del tráfico tiene un significativo efecto en la demora de la red
Estabilidad del Modelo Variación entre el mínimo y máximo del flujo que ingresa a la red Tabulación de máximos y mínimos de flujos por arco y cordón de acuerdo a variaciones del 20% (o 200 veh/h), 10% (o 100 veh/h) y 5% (o 50 veh/h)	Dentro del 5% Satisfacción del modelador	Cinco Corridas usando diferentes valores aleatorios de semillas

Fuente: Departamento de Transporte de California (2002)

El estadístico GEH se define como:

$$GEH = \sqrt{\frac{(q_{obs} - q_{sim})^2}{0.5(q_{obs} + q_{sim})}} \quad (5.1)$$

Donde,

q_{obs} : Flujo vehicular observado en el periodo considerado

q_{sim} : Flujo vehicular simulado en el periodo considerado

Para la calibración de la demanda se utilizara el estadístico GEH (3.2). En donde se considerara a nivel de red que un 85% de arcos con un GEH inferior a 5 es un ajuste satisfactorio.

Para el proceso de calibración de segundo nivel se considera los largos de cola en intersecciones, el indicador a nivel de red es el I.D. (5.2). Con esto, el objetivo del segundo nivel de calibración se resume en encontrar los valores de los parámetros de comportamiento vehicular que minimicen el indicador de desempeño.

$$I.D. = \sum_{i=accesos} \frac{|cola_{obs,i} - cola_{sim,i}|}{cola_{obs,i}} \times \frac{cola_{obs,i}}{cola_{obs,red}} \quad (5.2)$$

Por último, para el proceso de validación se comparan los tiempos de viajes observados y simulados de determinados ejes. En donde se considerará que al menos el 85% de los ejes simulados este dentro del 10% de diferencia relativa con respecto a la medición real.

➤ *Calibración de la demanda.*

En este nivel es en donde se comparan los flujos vehiculares simulados con los observados. Aquí se calibra los parámetros a nivel de red, incluyendo el modelo de elección de ruta que se utilizará durante el siguiente nivel de red. Se seleccionan aquellos valores de parámetros que minimicen el GEH promedio global a nivel de red y que además el 85% de la muestra de flujos en arcos tengan un GEH inferior a 5.

Los valores de flujos en arcos obtenidos utilizando la configuración anterior, así como también el valor del GEH en los distintos arcos y a nivel global, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 35. Estadístico GEH de calibración de primer nivel

Intersección	Acceso	Flujos observados Veh/h	Flujos simulados Veh/h	GE H
Carrera 21 - calle 56	Carrera 21	940	910	1,0
	Calle 56 (Oriente)	2181	2068	2,5
	Calle 56 (Occidente)	1574	1426	3,8
Carrera 22 - Calle 56	Carrera 22	959	954	0,2
	Calle 56 (Oriente)	2267	2048	4,7
	Calle 56 (Occidente)	1765	1597	4,1
Diagonal 15 - calle 55	Calle 55	668	716	1,8
	Diagonal 15 (Norte)	1412	1509	2,5
	Diagonal 15 (Sur)	1775	2179	9,1
GEH < 5				89 %
GEH Promedio				3,2

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior, los flujos se ajustan de gran manera entre lo observado y simulado, siendo solamente el acceso sur de la diagonal 1, con un valor de GEH por sobre 5.

➤ *Calibración de Capacidad.*

En este nivel es en donde se calibra los parámetros de comportamiento vehicular y en donde el indicador a minimizar es el ID de longitud máxima de cola. Como indica la distinta literatura de calibración el primer paso es analizar la sensibilidad del indicador a los distintos parámetros físicos y de comportamiento de cada DVU.

Los valores iniciales o por defecto utilizado en el simulador TransModeler se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 36. Valores de parámetros generales TransModeler

Nombre	Valor	Unidad
Velocidad de formación de cola	1.0	[m/s]
Velocidad de disipación de cola	4.0	[m/s]
Tiempo de Reacción	0.75	[s]
Tiempo de Reacción en parada	1.35	[s]

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Valores de parámetros por defecto TransModeler, vehículos livianos

Nombre	Media	Desviación	Min.	Máx.	Unidad
Largo	4	0.5	3.4	4.6	Metros
Ancho	2	0	2	2	Metros
Velocidad máx. deseada	110	10	80	150	Km/h
Aceleración máx.	3	0.2	2.6	3.4	m/s ²
Desaceleración normal	4	0.25	3.5	4.5	m/s ²
Desaceleración máx.	6	0	6	6	m/s ²
Aceptación de Velocidad	1.1	0.1	0.9	1.3	
Distancia mín. entre veh.	1	0.3	0.5	1.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

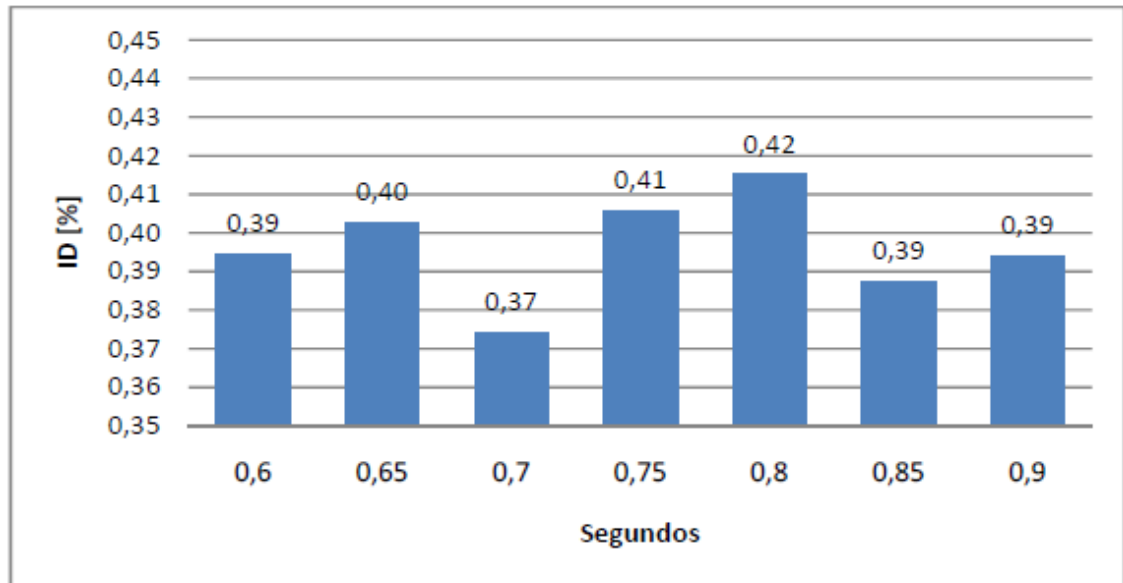
Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Valores de parámetros por defecto TransModeler, buses

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	12	2	9	15	Metros
Ancho	2.3	0.5	1.9	3	Metros
Velocidad máx. deseada	90	10	80	120	Km/h
Aceleración máx.	1	0.3	0.8	1.8	m/s ²
Desaceleración normal	2	2	1.5	4.8	m/s ²
Desaceleración máx.	6	2	4.5	8	m/s ²
Aceptación de Velocidad	1	0.1	0.9	1.1	
Distancia mín. entre veh.	1.5	0.5	1	2.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración propia

Figura 86. Análisis de sensibilidad parámetro paso de simulación

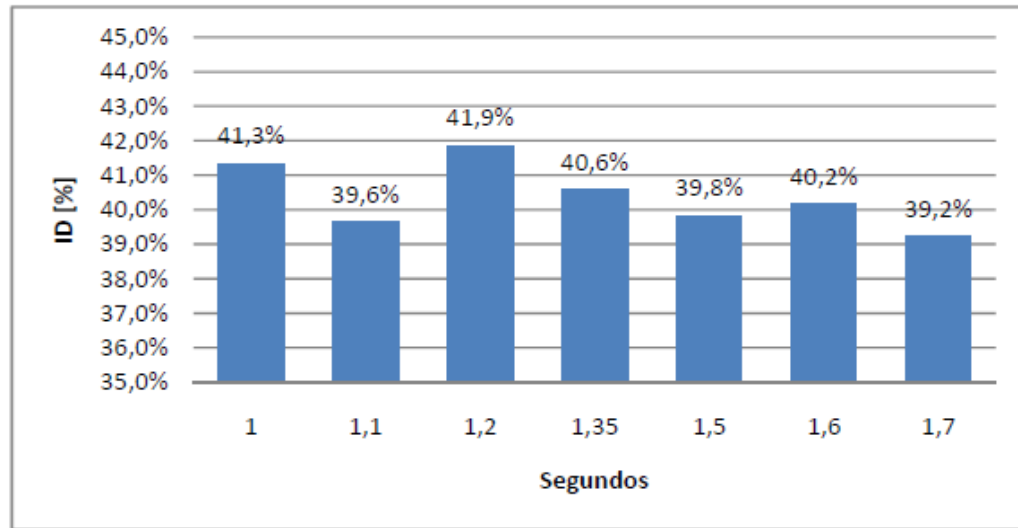


Fuente: Elaboración propia

De la figura anterior se desprende la variación del indicador ID que se obtiene al mover este parámetro, aunque esta variación no es regular, ya que crece y disminuye para valores mayores y menores que el por defecto. Con el valor de 0.7 del tiempo de reacción es en donde se obtiene el mejor ID.

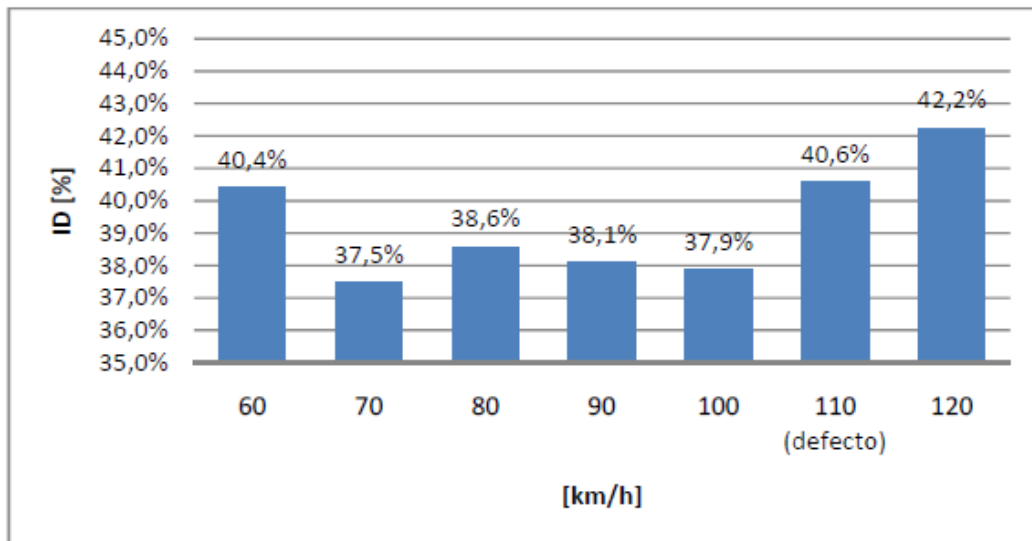
Para el caso del parámetro del tiempo de reacción en reposo, la variación con respecto al valor por defecto es insignificante, obteniendo una variación máxima de 1,4% con respecto al valor por defecto.

Figura 87. Análisis de sensibilidad parámetro tiempo de reacción en reposo



Fuente: Elaboración propia

Figura 88. Análisis de sensibilidad parámetro de velocidad deseada

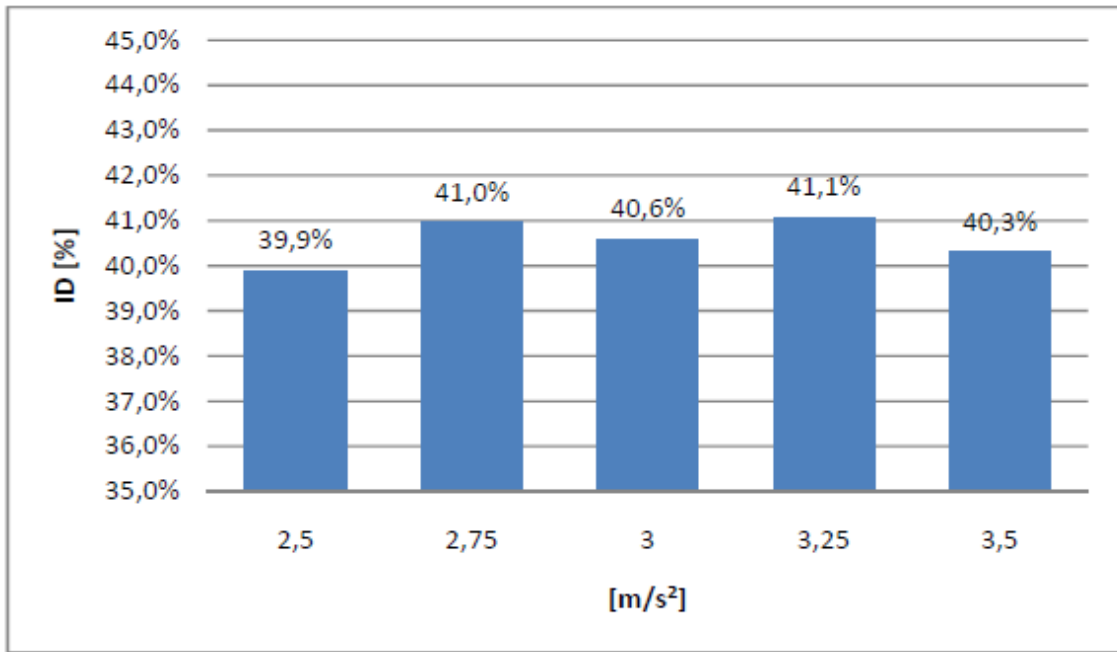


Fuente: Elaboración propia

Este parámetro también hace disminuir de manera significativa el indicador ID, obteniendo una mejoría en un 3.1%. Se observa que a medida que el parámetro disminuye el ID también hasta el valor de 40 [km/h]. Esto puede ocurrir ya que la velocidad máxima límite en la calle 56 es de 60 [km/h]. Además se debe

considerar que estamos frente a un periodo pico; en estudios similares este valor se ha calibrado en un valor de 45 km/h [88] para vehículos livianos en un período pico de la mañana.

Figura 89. Análisis de sensibilidad parámetro máxima aceleración



Fuente: Elaboración propia

Para este caso La variación del indicador ID es insignificante con respecto a este parámetro, alcanzándose un valor máximo de 0.7% de diferencia con respecto al valor por defecto.

En la siguiente tabla se muestra un resumen del proceso de análisis revisado anteriormente, en donde se presenta el coeficiente de variación del indicador de rendimiento y la mejora máxima obtenida dependiente del valor de cada parámetro de comportamiento.

Tabla 39. Resumen análisis de sensibilidad

Parámetro	Coefficiente de Variación ID	Mejora Obtenida ID [%]
Paso de Simulación	0.033	3.2
Tiempo de Reacción en Reposo	0.023	1.4
Velocidad Deseada	0.045	3.1
Max. Aceleración	0.011	0.7
Max. Desaceleración	0.021	0
Velocidad Formación de Cola	0.019	0
Velocidad Disipación de Cola	0.016	0
Distancia Mínima	0.028	0
Sensibilidad	0.011	0.4

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla anterior los parámetros más explicativos del indicador de rendimiento son el paso de simulación, el tiempo de reacción en reposo, la velocidad deseada y la distancia mínima. Sin embargo, sólo se tienen mejoras significativas con los primeros tres nombrados, por lo cual se utilizarán estos parámetros para mejorar el indicador de rendimiento de la red, y luego de analizar cuáles son los parámetros relevantes en el comportamiento de cada vehículo, se procedió a modificar los valores de estos parámetros en un proceso iterativo con el fin de mejorar el indicador ID en cada simulador.

Los resultados obtenidos del proceso de calibración para el simulador TransModeler se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 40. Valores de parámetros generales calibrados

Nombre	Valor	Unidad
Velocidad de formación de cola	1.0	[m/s]
Velocidad de disipación de cola	4.0	[m/s]
Tiempo de Reacción	0.7	[s]
Tiempo de Reacción en parada	1.35	[s]

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Valores de parámetros calibrados autos livianos

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	4	0.5	3.4	4.6	Metros
Ancho	2	0	2	2	Metros
Velocidad máx. deseada	70	10	50	100	Km/h
Aceleración máx.	3	0.2	2.6	3.4	m/s ²
Desaceleración normal	4	0.25	3.5	4.5	m/s2
Desaceleración máx.	6	0	6	6	m/s2
Aceptación de Velocidad	1.1	0.1	0.9	1.3	
Distancia mín. entre veh.	1	0.3	0.5	1.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Valores de parámetros calibrados buses

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	18	0	18	18	Metros
Ancho	2.3	0.5	1.9	3	Metros
Velocidad máx. deseada	60	10	50	80	Km/h
Aceleración máx.	1	0.3	0.8	1.8	m/s ²
Desaceleración normal	2	2	1.5	4.8	m/s2
Desaceleración máx.	6	2	4.5	8	m/s2
Aceptación de Velocidad	1	0.1	0.9	1.1	
Distancia mín. entre veh.	1.5	0.5	1	2.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración propia

El indicador ID calibrado arroja un valor de 15.1%, el cual es una disminución en un 11% relativo al valor de este indicador con los valores de los parámetros por defecto.

5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado todo el proceso de montaje de cada uno de los escenarios y el proceso de calibración, se procede a correr cada modelo para la obtención y el posterior análisis de resultados.

5.5.1. Resultados a nivel de demanda

Los primeros resultados que se muestran se refieren a las velocidades promedio de operación obtenidas para cada uno de los escenarios en diferentes corredores que se encuentran en la zona de influencia del proyecto, además del nivel de servicio, estos resultados no solo se muestran para la situación de flujo actual, sino que también se muestran en su proyección a 5, 10, y 20 años, en la tabla 43 se muestran los resultados obtenidos.

Estos resultados dejan ver la situación en la que se encuentra en la actualidad la zona de estudio, presentando niveles de servicio E y F en muchas de sus intersecciones y manejando velocidades que en ningún caso superan los 20 Kph, esta situación es preocupante al revisar la proyección para 5, 10 y 20 años, ya que muchos de los ejes llagan a nivel F en un periodo máximo de 10 años, con velocidades promedio de operación muy bajas, que en algunos casos incluso llega a los 5 kph. De ahí se demuestra la importancia de la propuesta de solución para la movilidad del sector.

Al revisar el escenario de la intersección diamante convencional se observa que se presenta un comportamiento muy similar tanto para el caso en el que se aplica el modelo IDIRMS, como cuando se aplica el modelo DRIVE, dejando ver la funcionalidad y ventajas de la aplicación de cualquiera de los dos modelos, si se comparan estos resultados con el escenario de la situación actual se observa que existe un mejoramiento considerable, a tal punto que para el año base los niveles de servicio en su mayoría son todos D y existe un aumento de la velocidad promedio de casi un 30%, lo que deja ver lo beneficioso de la alternativa diamante convencional.

Aunque la proyección de flujos muestra que su deterioro se empieza a presentar después de superado el periodo de 5 años, siendo más evidente a los 10 años y ya en operaciones similares al escenario actual para el año 20.

Tabla 43. Resultados de velocidad y NDS por escenario

Escenario	TRAMO EN ANALISIS	ACTUAL		5 AÑOS		10 AÑOS		20 AÑOS	
		NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)
Actual	Calle 56 (Occidente - Oriente)	E	16,7	F	12,7	F	10,4	F	8,4
	Calle 56 (Oriente - Occidente)	F	13,8	F	9,8	F	7,1	F	5,2
	Calle 52 (Oriente - Occidente)	E	19,7	E	16,6	E	14,2	F	11,5
	Calle 55 (Occidente - Oriente)	E	18,5	F	15,3	F	13,8	F	11,2
	Calle 54 (Occidente - Oriente)	E	18,9	F	15,4	F	13,1	F	11,1
	Av. González Valencia (Norte-sur)	E	18,3	F	15,8	F	13,4	F	10,3
	Av. González Valencia (Sur-Norte)	E	18,4	F	15,4	F	14,1	F	11,5
	Carrera 21	E	16,2	F	14,3	F	11,4	F	9,4
	Carrera 22	E	17,8	F	15,1	F	12,5	F	10,4
	Carrera 27 (Norte - Sur)	E	16,3	E	15,4	F	13,2	F	11,1
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	19,5	E	18,2	E	16,8	F	13,5
	Carrera 33 (Norte - Sur)	F	14,1	F	11,5	F	8,9	F	6,5
	Carrera 33 (Sur - Norte)	E	19,3	E	16,8	E	14,3	F	12,2
Diamante convencional (IDIRMS)	Calle 56 (Occidente - Oriente)	D	23,5	D	20,6	E	18,2	E	16,4
	Calle 56 (Oriente - Occidente)	D	22,4	D	20,4	E	17,6	F	15,5
	Calle 54 (Oriente - Occidente)	D	22,5	D	20,4	E	18,8	E	16,5
	Calle 55 (Occidente - Oriente)	D	21,6	E	19,7	E	17,5	F	15,4
	Carrera 27 (Norte - Sur)	D	24,5	D	22,6	D	20,1	E	18,5
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	25,4	D	22,8	D	20,5	E	17,6
	Carrera 33 (Norte - Sur)	D	21,5	E	19,8	E	16,4	F	15,2
Carrera 33 (Sur - Norte)	D	20,5	E	18,8	F	15,6	F	14,1	
Diamante convencional (DRIVE)	Calle 56 (Occidente - Oriente)	D	21,5	D	19,8	E	17,4	E	14,4
	Calle 56 (Oriente - Occidente)	D	23,9	D	20,4	E	18,3	F	15,3
	Calle 54 (Oriente - Occidente)	D	27,5	D	23,2	D	21,2	E	18,5
	Calle 54 (Occidente - Oriente)	D	28,9	D	21,2	D	18,5	E	15,5

	Calle 55 (Occidente - Oriente)	D	21,5	D	18,9	E	16,2	E	13,1
	Carrera 21	E	18,4	E	17,5	F	15,3	F	13,3
	Carrera 22	D	19,5	E	18,8	E	16,4	F	14,1
	Carrera 27 (Norte - Sur)	D	25,6	D	23,4	D	20,4	E	18,4
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	26,5	D	24,5	D	21,2	E	18,8
	Carrera 33 (Norte - Sur)	D	21,5	D	20,4	E	16,4	F	15,2
	Carrera 33 (Sur - Norte)	D	22,3	D	20,1	E	18,4	F	14,1
Diamante divergente (IDIRMS)	Calle 56 (Occidente - Oriente)	D	20,2	D	19,8	E	17,6	E	14,7
	Calle 56 (Oriente - Occidente)	D	19,8	E	16,5	F	14,2	F	12,4
	Calle 54 (Oriente - Occidente)	D	21,2	D	20,1	E	17,5	F	14,2
	Calle 54 (Occidente - Oriente)	D	25,3	D	21,7	E	17,7	F	14,7
	Calle 55 (Occidente - Oriente)	D	20,4	D	18,2	E	15,5	F	13,4
	Carrera 21	E	16,5	F	14,1	F	15,3	F	13,3
	Carrera 22	D	20,2	E	18,8	E	16,4	F	14,1
	Carrera 27 (Norte - Sur)	D	23,5	D	20,2	E	17,7	F	14,2
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	24,3	D	21,3	D	18,7	E	15,3
	Carrera 33 (Norte - Sur)	D	20,2	E	18,5	E	15,7	F	13,1
	Carrera 33 (Sur - Norte)	D	21,2	D	19,4	E	17,2	F	14,2
Diamante divergente (DRIVE)	Calle 56 (Occidente - Oriente)	D	24,6	D	21,8	E	19,4	E	16,4
	Calle 56 (Oriente - Occidente)	D	23,5	D	20,9	E	18,3	F	15,3
	Calle 54 (Oriente - Occidente)	D	23,2	D	21,6	D	20,3	E	17,6
	Calle 54 (Occidente - Oriente)	D	22,1	D	20,4	E	18,2	E	16,5
	Calle 55 (Occidente - Oriente)	D	21,5	D	21,0	E	19,3	E	16,5
	Av. González Valencia (Norte-sur)	E	19,1	E	17,1	F	15,5	F	12,5
	Av. González Valencia (Sur-Norte)	E	18,6	E	16,4	F	14,6	F	11,9
	Carrera 21	E	19,4	E	17,3	F	15,1	F	13,4
	Carrera 22	D	20,4	E	18,8	E	16,1	F	14,1
	Carrera 27 (Norte - Sur)	D	22,5	D	20,1	E	18,1	E	16,1
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	24,6	D	22,4	D	20,1	E	17,4
	Carrera 33 (Norte - Sur)	D	21,5	D	20,4	E	16,4	F	15,2
	Carrera 33 (Sur - Norte)	D	22,3	D	20,1	E	18,4	F	14,1

Glorieta a desnivel	Calle 56 (oriente - occidente)	D	21,6	E	19,9	E	17,9	F	14,7
	Calle 56 (occidente - oriente)	D	24,5	E	18,9	E	17,2	F	15,1
	Carrera 15 (norte -sur)	D	22,5	D	20,4	E	17,6	F	13,3
	Carrera 15 (sur-norte)	D	20,8	D	20,1	E	18,3	F	13,1
	Carrera 27 (norte-sur)	D	24,9	E	18,9	E	16,1	F	13,8
	Carrera 27 (sur-norte)	E	19,7	E	19,6	E	18,7	F	14,1
	AV. González Valencia (sur-norte)	E	20,6	E	16,2	F	15	F	12,8
	AV González Valencia (norte-sur)	E	19,3	E	19,1	E	17,7	F	14,1
	Calle 54 (oriente-occidente)	D	26,4	D	24,7	E	20,5	F	15,1
	Carrera 17 (norte-sur)	D	24,6	D	23,4	E	19,8	F	15,9
	Carrera 33 (sur-norte)	D	23,9	E	20,8	E	17,4	F	12,5
	Carrera 33 (norte-sur)	D	22,5	E	18,8	F	14,8	F	12,4
	Carrera 21	E	20,2	E	18	F	13,2	F	9,5
	Carrera 22	E	20,8	E	17,1	E	14,8	F	12,6
	Carrera 36	D	25,6	D	23,3	E	19,8	E	16,8
Calle 55	E	20,6	E	17,4	F	15,1	F	10,8	
Tercer carril	Calle 56 (Occidente - Oriente)	E	16,7	F	12,7	F	10,4	F	8,4
	Calle 56 (Oriente - Occidente)	E	18,9	E	14,5	F	11,2	F	8,6
	Calle 52 (Oriente - Occidente)	E	19,7	E	16,6	E	13,1	F	11,9
	Calle 55 (Occidente - Oriente)	E	14,5	F	15,3	F	13,8	F	11,7
	Calle 54 (Occidente - Oriente)	E	18,9	F	14,5	F	13,1	F	11,1
	Av. González Valencia (Norte-sur)	E	19,4	F	15,8	F	13,4	F	10,3
	Av. González Valencia (Sur-Norte)	E	18,4	F	15,4	F	14,3	F	11,4
	Carrera 21	E	17,6	F	15,3	F	11,4	F	9,4
	Carrera 22	E	17,8	F	15,1	F	12,5	F	10,4
	Carrera 27 (Norte - Sur)	E	19,5	E	15,0	F	12,4	F	9,5
	Carrera 27 (Sur - Norte)	D	22,4	E	17,2	E	13,3	F	10,2
	Carrera 33 (Norte - Sur)	F	14,1	F	11,5	F	8,9	F	6,5
	Carrera 33 (Sur - Norte)	E	19,3	E	16,8	E	14,3	F	12,2

Para el caso del escenario en el que se aplica la intersección divergente diamante, al igual que en el escenario de la intersección diamante convencional, los dos modelos IDIRMS y DRIVE presentan condiciones operacionales muy favorables para la zona de influencia en comparación con las condiciones mostradas por el escenario 1, la diferencia radica en que resulta mucho más favorable el uso de la intersección diamante convencional que la divergente diamante, esto se observa debido a la mayor cantidad de intersecciones con niveles de servicio E y a la leve disminución de velocidad de algunos corredores en comparación con el escenario 2, siendo mucho más desfavorable la comparación para el modelo DRIVE, esto debido a las bajas tasas de flujo de saturación que maneja este último, que provocan en el modelo una acumulación extra de vehículos en las intersecciones semaforizadas en comparación con el modelo IDIRMS.

El escenario 5 que contempla el diseño de un paso a desnivel, es el más eficiente en cuanto al mejoramiento de la operación de la intersección específica de la carrera 27 con calle 56, pero en cuanto a su nivel de afectación positiva en otras intersecciones, no resulta tan determinante como si lo muestran los resultados obtenidos para los escenarios de las intersecciones diamante, dejando entrever que la solución que se plantee debe apuntar a un mejoramiento integral del corredor de la calle 56 y no de una solución puntual.

Por último para el escenario 5 que implica la implementación de un tercer carril, los resultados obtenidos son muy similares al escenario 1, presentando un leve mejoramiento en los sentidos que tienen que ver con el giro izquierdo, ocurriendo un fenómeno muy similar al del escenario 4, donde el beneficio de la alternativa solo es aplicado en un punto, en este caso una intersección, dejando los otros corredores sin ningún tipo de impacto positivo.

Con la información recopilada en campo para la calibración del modelo inicial, se establecen otros resultados, como son los tiempos de viaje para diferentes trayectos comprendidos en la zona de influencia.

Los resultados que se obtuvieron para cada escenario fueron los siguientes:

Tabla 44. Tiempos de viaje escenario 1

RUTA		ESCENARIO 1				
		NUMERO DE VEHÍCULOS SIN PROYECTO	SÁBADO 11 JUNIO 2011 (3:45 PM - 4:45 PM)		LUNES 13 JUNIO 2011 (11:45 AM - 12:45 PM)	
			TIEMPO (Minutos)	V (Kph)	TIEMPO (Minutos)	V (Kph)
1	González Valencia con Cra 27-Cra 33 con Calle 62	1247	02:41	23,79	02:34	29,57
2	Glorieta Ciudadela con Calle 56-Cra 36	663	08:00	19,38	10:27	16,66
3	Cra 36-Glorieta Ciudadela con Calle 56	1385	13:40	15,32	25:05	16,35
4	Ciudadela Calle 55-Cra 27 con Calle 54	775	11:08	12,23	08:28	16,82
5	Carrera 31 con Calle 49-Ciudadela	761	21:55	12,74	10:30	18,25
6	Carrera 36 - Carrera 27 con Calle 56 (Giro izquierdo)	512	04:44	22,24	19:45	14,42
7	Carrera 32 con Calle 62 - Carrera 27 con Av. González Valencia	688	08:45	14,55	10:36	13,26
8	Carrera 21 con Diagonal 15 - Carrera 17 con Calle 56	637	11:32	10,25	10:16	12,42
9	Carrera 22 con Calle 48 - Carrera 17 con calle 56	386	09:45	21,56	12:25	16,54

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Tiempos de viaje escenario 2

RUTA		ESCENARIO 2.1		ESCENARIO 2.2	
		TIEMPO (Minutos)	V (Kph)	TIEMPO (Minutos)	V (Kph)
1	González Valencia con Cra 27-Cra 33 con Calle 62	02:24	26,64	02:04	27,45
2	Glorieta Ciudadela con Calle 56-Cra 36	06:49	24,59	05:49	27,65
3	Cra 36-Glorieta Ciudadela con Calle 56	06:53	24,39	05:13	26,15
4	Ciudadela Calle 55-Cra 27 con Calle 54	06:16	23,15	06:03	23,85
5	Carrera 31 con Calle 49-Ciudadela	05:07	22,49	04:49	24,35
6	Carrera 36 con Calle 56 - Carrera 27 con calle 58 (Giro izquierdo)	04:18	20,54	04:08	21,56
7	Carrera 32 con Calle 62 - Carrera 27 con Av. González Valencia	06:35	18,25	06:25	19,75
8	Carrera 21 con Diagonal 15 - Carrera 17 con Calle 54	08:45	21,45	07:13	23,54
9	Carrera 22 con Calle 48 - Carrera 17 con calle 56	06:35	25,48	07:55	22,16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Tiempos de viaje escenario 3

<i>RUTA</i>		<i>ESCENARIO 3,1</i>		<i>ESCENARIO 3,2</i>	
		<i>TIEMPO (Minutos)</i>	<i>V (Kph)</i>	<i>TIEMPO (Minutos)</i>	<i>V (Kph)</i>
1	González Valencia con Cra 27-Cra 33 con Calle 62	02:44	25,25	02:54	21,96
2	Glorieta Ciudadela con Calle 56-Cra 36	06:19	26,15	06:35	22,74
3	Cra 36-Glorieta Ciudadela con Calle 56	05:43	24,35	06:12	21,17
4	Ciudadela Calle 55-Cra 27 con Calle 54	05:35	27,68	05:55	24,07
5	Carrera 31 con Calle 49-Ciudadela	03:45	28,15	03:56	24,48
6	Carrera 36 con Calle 56 - Carrera 27 con calle 58 (Giro Izquierdo)	04:08	21,56	04:21	18,75
7	Carrera 32 con Calle 62 - Carrera 27 con Av. González Valencia	06:25	19,75	06:35	17,17
8	Carrera 21 con Diagonal 15 - Carrera 17 con Calle 54	06:45	25,15	06:45	21,87
9	Carrera 22 con Calle 48 - Carrera 17 con calle 56	06:24	24,19	06:44	21,03

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47. Tiempos de viaje escenario 4 y 5

<i>RUTA</i>		<i>ESCENARIO 4</i>		<i>ESCENARIO 5</i>	
		<i>TIEMPO (Minutos)</i>	<i>V (Kph)</i>	<i>TIEMPO (Minutos)</i>	<i>V (Kph)</i>
1	González Valencia con Cra 27-Cra 33 con Calle 62	02:35	26,72	03:14	23,23
2	Glorieta Ciudadela con Calle 56-Cra 36	06:45	23,12	09:34	20,10
3	Cra 36-Glorieta Ciudadela con Calle 56	04:35	22,45	14:43	19,52
4	Ciudadela Calle 55-Cra 27 con Calle 54	05:46	24,56	08:28	21,36
5	Carrera 31 con Calle 49-Ciudadela	04:23	30,12	09:15	26,19
6	Carrera 36 con Calle 56 - Carrera 27 con calle 58 (Giro Izquierdo)	04:26	22,35	09:23	19,43
7	Carrera 32 con Calle 62 - Carrera 27 con Av. González Valencia	06:25	18,76	10:36	16,31
8	Carrera 21 con Diagonal 15 - Carrera 17 con Calle 54	06:18	27,86	10:46	24,23
9	Carrera 22 con Calle 48 - Carrera 17 con calle 56	06:04	26,34	23:25	22,90

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en los resultados de velocidades y niveles de servicio para las intersecciones, para el caso de los tiempos de viaje el comportamiento es muy similar en lo que se refiere a que los peores tiempos los muestra el escenario 1 y en el escenario 5 resultan ser muy similares con una leve mejoría.

Para el caso del escenario 2 y 3, muestran los mejores resultados, superando el escenario 4 de la glorieta a de nivel, pero al igual que en el caso anterior, siendo el modelo IDIRMS para la intersección diamante convencional la que mejores tiempos muestra, seguido por el modelo DRIVE, el cual tiene un comportamiento muy similar en ambos escenarios.

Por último se muestran a continuación los resultados obtenidos para los criterios tenidos en cuenta durante el proceso de calibración, como son:

- Total demoras
- Demoras por vehículo
- Demoras por parada
- Demoras por parada por vehículo
- Total paradas

Tabla 48. Resultados operacionales de demoras escenarios 1, 2.1 y 2.2

CRITERIO EVALUADOR	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2,1	ESCENARIO 2,2
Total demoras (hr)	169,4	56,1	52,4
Demoras / Vehículo (Seg)	79,7	80,2	75,0
Demoras por parada (Seg)	132,6	83,4	76,5
Demoras por parada /Vehículo (Seg)	62,4	62,5	56,3
Total paradas	7.706	6.755	6372,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Resultados operacionales de demoras escenarios 3.1, 3.2, 4 y 5

CRITERIO EVALUADOR	ESCENARIO 3,1	ESCENARIO 3,2	ESCENARIO 4	ESCENARIO 5
Total demoras (hr)	37,1	36,4	149,9	96,8
Demoras / Vehículo (Seg)	26,7	25,7	70,5	44,5
Demoras por parada (Seg)	19,7	19,3	117,3	72,5
Demoras por parada /Vehículo (Seg)	14,2	12,9	56,2	35,5
Total paradas	4.205	4090,5	6929,9	4614,4

Fuente: Elaboración propia

Estos últimos resultados permiten ver, un gran impacto en la reducción de colas y tiempo de parada de vehículos en la red, en comparación con el escenario actual o escenario base, además los mejores resultados se muestran en el escenario 3, donde se implementa la intersección divergente diamante, siendo en ese escenario más efectivo el modelo DRIVE, con una disminución promedio del 78% en el total de demoras, en comparación de un 68% que reduce la intersección diamante convencional.

El escenario 4 aunque reduce también considerablemente las demoras y el número de paradas no se compara con los escenarios 2 y 3, ya que su disminución esta en promedio en el 43%.

Con base en los resultados obtenidos, se puede ver que las intersecciones diamantes operan adecuadamente bajo las condiciones en las que han sido sometidas en el modelo, lo que da un buen indicio de su efectividad operacional en las ciudades colombianas.

5.5.2. Matriz multicriterio

El análisis de resultados no solo se centra en los parámetros de tráfico de cada escenario, también influye otros factores como son aspectos de seguridad vial, de diseño geométrico, aspectos ambientales, sociales y de construcción, así como el costo económico, es por eso que la evaluación de las alternativas se puede realizar mediante la utilización de una matriz multicriterio cuyos parámetros generales permiten efectuar un análisis de las condiciones de la situación actual y el efecto que tienen las alternativas que se han estudiado para mejorar la movilidad de la zona de estudio.

➤ *Variables a evaluar*

Para evaluar cada una de las alternativas propuestas se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Evaluación de impactos urbanísticos.
- Movilidad: Tráfico vehicular y peatonal, y su conectividad.
- Evaluación financiera.
- Evaluación de impactos ambientales por ruido, vibraciones y contaminación del aire.

Para definir los criterios de selección, se revisaron evaluaciones que en Bogotá D.C, principalmente ha utilizado el Departamento Administrativo de Planeación Distrital, ahora Secretaría de Planeación del Distrito Capital, como la utilizada en el estudio que tuvo por objeto: “Estudios para Definir y Precisar las Zonas de Reservas Viales Producidas por el Subsistema Vial del Distrito Capital” adelantado durante el año 2005, las cuales fueron utilizadas igualmente para el proyecto de las intersecciones vehiculares. A partir de las condiciones particulares del municipio y del alcance del estudio que adelantó la Universidad Industrial de Santander, se ajustaron algunos de los criterios y se incorporaron otros que están acordes con las condiciones de la ciudad.

En desarrollo de la presente investigación se analizan los siguientes componentes:

- Urbanismo.
- Movilidad.
- Prediseño geométrico y de seguridad vial.
- Impactos ambientales.
- Impactos sociales.
- Construcción: en el que se miden las siguientes variables

- ✓ Riesgos por inestabilidades generadas.
 - ✓ Magnitud de interferencias e impactos.
 - ✓ Afectación a predios.
 - ✓ Afectación al tránsito vehicular durante la construcción.
- Inversión

Teniendo en cuenta que las variables requieren una ponderación para evaluar cada una de las alternativas, en la siguiente tabla se proponen los valores porcentuales que debe tener cada una de ellas.

Tabla 50. Variables a tener en cuenta

VARIABLE	% PROPUESTO
Urbanismo	20
Tránsito y Transporte	20
Prediseño geométrico y de seguridad vial	10
Impactos Ambientales	10
Impactos Sociales	10
Construcción	10
<i>Riesgos por Inestabilidades generadas</i>	<i>1</i>
<i>Magnitud de interferencias sobre redes de servicios públicos</i>	<i>2</i>
<i>Afectación a predios</i>	<i>5</i>
<i>Afectación al tránsito vehicular</i>	<i>2</i>
Inversión	20

Fuente: Elaboración propia

➤ *Aspectos de urbanismo*

Para este aspecto se consideran varios criterios, el primero de ellos tiene que ver con la alternativa que más aproveche la infraestructura existente.

El siguiente criterio corresponde a la calidad del diseño urbano en la inserción del proyecto futuro y su entorno, en la cual se valoran las interferencias visuales, los cambios volumétricos, e incluye los siguientes aspectos:

- Generación de espacio público.
- Afectación al paisaje (cambios de continuidad espacial).
- Afectación al patrimonio (instituciones y demás).
- Generación de espacio público abierto que permita el libre tránsito peatonal y evite el aislamiento de construcciones.
- Las variables de accesibilidad y conectividad están consideradas dentro de la calidad del diseño urbano y dentro de los aspectos de movilidad.

➤ *Variables referidas a la movilidad*

Los pesos relativos a cada indicador, se asignan de acuerdo a la evaluación de las siguientes variables:

- Niveles de servicio.
- Eficacia en resolución de movimientos a lo largo de los corredores.
- Integración Intermodal o continuidad en las soluciones no motorizadas del proyecto.
- Aumento en la velocidad media de la red.
- Reducción en el consumo de combustible total en la red.

➤ *Niveles de Servicio.*

El Nivel de Servicio de la infraestructura vial está directamente relacionado con su capacidad, permitiendo realizar, en términos cualitativos, la evaluación de la suficiencia de una vía; describiendo, además, las condiciones de operación del flujo vehicular y su percepción por parte de los usuarios. Dado que la determinación de éste indicador está en función de variables como el volumen y la composición del tránsito, y las condiciones geométricas de la infraestructura vial

analizada, se considera como un indicador prioritario en la evaluación del proyecto objeto de estudio, razón por la cual se asignó:

- Valor porcentual máximo (100 %) para las condiciones que ofrezcan el mejor nivel de servicio “C”.
- Un porcentaje del 50% para la condición mínima aceptada, la cuál es considerada como nivel de servicio “D”
- Un valor de 0 % para las condiciones que no cumplen con la condición mínima especificada.
- Un 80% cuando el nivel de servicio se encuentre entre “A” y “B” con el fin de calificar desfavorablemente el sobredimensionamiento del diseño.

Los parámetros para asignar los rangos de valores se presentan a continuación

Tabla 51. Clasificación establecida para los niveles de servicio en intersecciones

NIVEL DE SERVICIO A 20 AÑOS	DEMORAS EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS (SEG./VEH)	DEMORAS EN INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS (SEG./VEH)	PORCENTAJE POR ASIGNAR EN LA MATRIZ
A	0 – 10	0 – 10	80
B	>10 – 20	>10 – 15	80
C	>20 – 35	>15 – 25	100
D	>35 – 55	>25 – 35	50
E	>55 – 80	>35 – 50	0
F	>80	>50	0

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Bogotá D.C.

➤ *Eficacia en resolución de movimientos.*

Éste parámetro evalúa la facilidad de conexión de los flujos vehiculares a través de las intersecciones, de acuerdo con la disminución o aumento en la distancia de éstos en relación con las diferentes alternativas de solución planteadas, al ser comparadas entre sí.

Se establecen tres tipos de recorridos a través de las intersecciones, evaluando únicamente los movimientos de giros izquierdo y/o derecho.

Una conexión “directa” se considera cuando desde el acceso a la intersección, el vehículo realiza una trayectoria simple para completar el giro derecho o izquierdo dentro del área enmarcada por los corredores viales que conforman la intersección, una glorieta por ejemplo, sin necesidad de utilizar una oreja o una oreja-manzana.

Una conexión de tipo “medio” es aquella que para completar la maniobra de giro requiere utilizar una oreja.

La conexión de tipo “largo” corresponde a la realizada a través de orejas manzana u oreja barrio colindantes con la intersección analizada. De acuerdo con lo anterior, se consideraron los valores presentados en la siguiente tabla:

Tabla 52. Clasificación establecida para la resolución de movimientos vehiculares

MEDICION DEL RECORRIDO	CONSIDERACION	PORCENTAJE ASIGNADO
<u>Directo</u>	Giros realizados de manera directa desde los accesos	<u>100</u>
<u>Medio</u>	Giros realizados a través de orejas integradas a la intersección	<u>75</u>
<u>Largo</u>	Giros realizados a través de orejas-manzana colindantes a la intersección	<u>35</u>
<u>Inexistente</u>	Cuando no existe la posibilidad de realizar el giro	<u>0</u>

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Bogotá D.C.

➤ *Continuidad en las soluciones no motorizadas*

Este indicador considera la integralidad en las propuestas, en relación con la movilidad de los modos de transporte alternativos (peatones y bicicletas) a través de las intersecciones y su conectividad en la zona de influencia, resaltando la importancia de éstos flujos dentro de las intersecciones, además de garantizar la seguridad de los mismos, al calificar con mejores puntajes aquellas soluciones que manejan una continuidad en el trazado de los andenes y senderos peatonales. En caso de permitirse la continuidad de las trayectorias peatonales y de bicicletas pero de manera sinuosa dentro del proyecto o en las zonas aledañas a éste, la alternativa analizada tendrá una calificación intermedia y en las propuestas donde se no se reconozca la importancia de movilidad que tienen tanto peatones como usuarios de bicicletas, con conexiones incompletas o truncadas, se les asignará la menor calificación.

Tabla 53. Clasificación establecida para la integración modal en intersecciones

CONDICIÓN	CONSIDERACION	PORCENTAJE ASIGNADO
<u>Alta</u>	Cuando la propuesta permite la movilidad de peatones y ciclistas de manera ininterrumpida a través del Proyecto.	<u>100</u>
<u>Media</u>	Cuando por efectos de la propuesta, alguno de los flujos de peatones, o ciclistas, no pueden acceder a un punto opuesto de manera directa. (trayectoria sinuosa)	<u>60</u>
<u>Baja</u>	Cuando no se presenta continuidad para el paso de peatones o ciclistas por el Proyecto	<u>10</u>

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Bogotá D.C.

➤ *Aumento de la velocidad media de la red*

La infraestructura vial a implementar debe aportar mejoras en la movilidad del sector. Este mejoramiento debe reflejar un aumento en la velocidad vehicular media de la red, a lo cual se le otorgan de 0 a 100% del puntaje máximo de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 54. Aumento de la velocidad media de la red

CONDICIÓN	CONSIDERACIÓN	PORCENTAJE ASIGNADO
<u>Alto</u>	>5 Kph	<u>100</u>
<u>Medio</u>	>2-5 Kph	<u>65</u>
<u>Bajo</u>	1-2 Kph	<u>35</u>
<u>Nulo</u>	<1 Kph	<u>0</u>

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Bogotá D.C.

Para la evaluación de los impactos ambientales que genera cada una de las alternativas y dado que el alcance de la presente investigación no se contempla un estudio ambiental para cada escenario, se consideran los siguientes criterios para el análisis:

➤ *Intervención de cauces*

Dada las condiciones topográficas, hídricas y geográficas de la Meseta de Bucaramanga, se ha considerado importante que los proyectos no tengan intervención sobre las cuencas hídricas del municipio y en lo posible las soluciones tengan la menor afectación a estas cuencas, por lo tanto se propone que la alternativa que no presente interferencia obtendrá un puntaje de 100 % y la que tenga alguna afectación puntaje de 0%.

➤ *Calidad del aire y ruido*

Aunque no se tienen valores de referencia que permitan determinar si una propuesta mejora o no la calidad del aire y ruido, se asumió que este mejoramiento está asociado a la velocidad de operación que pueda generar cada

propuesta en los sitios de intersección. Se otorgará el mayor puntaje (100%) a la alternativa que presente una velocidad promedio de operación mayor a 40 Km y se considerará mejora significativa, cuando la calificación está entre 30 Km/h y 40 Km/h se considerará que la mejora no es significativa y si es menor de 30 Km/h se considera que no cambia nada las condiciones.

➤ *Cambio del entorno y paisajística*

Este criterio tiene por objeto calificar el mejoramiento al entorno que puede generar cada una de las soluciones otorgando un valor agregado en el componente paisajístico de la zona y que permita recuperar en una importante proporción las condiciones ambientales de las zonas que lo rodean. Para este análisis se dará una calificación del 100 % a la propuesta que presente una mejora notoria, un 60% a la que presente una mejora visual y no obtendrá ningún puntaje la que no cambie en nada la situación actual.

➤ *Impactos sociales*

Para este componente de la matriz multicriterio se proponen analizar las siguientes condiciones:

- Modos de vida.
- Actividades económicas.
- Conflictos e incomodidades a la comunidad.
- Población a desplazar.

a. Modos de vida

Este criterio busca determinar si la solución que se presenta perturba el modo de vida de la comunidad que se encuentra alrededor y que principalmente se está viendo actualmente afectada por problemas de movilidad, ruido, conectividad y servicios para la comunidad. La calificación que se propone es otorgar un puntaje del 100 % a la alternativa que Mejora significativamente, un valor de 0% a la que no mejora nada y un puntaje negativo a la que Afecta significativamente.

b. Actividades económicas

Con el desarrollo de cada una de las propuestas se puede generar una mejora, una afectación o no cambiar las condiciones del comercio en general que presta sus servicios a la zona. Para este criterio al igual que para el anterior se propone una calificación del 100 % a las propuestas que den una mejora significativa, ningún puntaje a la que no cambie las condiciones y un valor negativo a la que desmejore las condiciones existentes y Afecta negativamente las actividades económicas del sector.

c. Conflictos e incomodidades a la comunidad.

Este indicador busca determinar los conflictos e incomodidades que se generarían a la comunidad durante la construcción de la obra. Aunque las soluciones que se planteen posiblemente todas tengan afectación, lo primordial acá es medir si se tiene una afectación parcial o impacto alto. El puntaje del 100 % se otorgará a la propuesta que No afecta, ningún puntaje a la que afecta parcialmente y puntaje negativo a la que tiene un impacto alto.

d. Población a desplazar

Este criterio busca determinar la alternativa que menos afectación genera por el desplazamiento de comunidad por efecto de adquirir la zona requerida para la ejecución del proyecto. Se otorgará un puntaje de 100 % a la alternativa que menos desplazamiento genere, y disminuirá 25 % por cada propuesta.

➤ Variables referidas a la etapa de construcción

Durante la etapa de construcción se consideran las variables relacionadas con riesgos por inestabilidades generadas, magnitud de interferencias sobre redes de servicios públicos, afectación a predios y afectación al tránsito vehicular durante la construcción.

a. Riesgos por Inestabilidades generadas

En función de la presencia de riesgos de inestabilidades generadas con cada alternativa, se otorga el máximo puntaje a la alternativa que no genere inestabilidades, y 0 puntos a las alternativas que generen algún tipo de inestabilidad.

b. Magnitud de interferencias sobre redes de servicios públicos

Se analiza la incidencia en cada alternativa, dando una calificación alta, media, media moderada o baja de acuerdo al costo e implicaciones o dificultad que requiera la adecuación. Se otorga el máximo puntaje (100% equivalente a 20 puntos) a la alternativa que genere las menores interferencias y se reduce proporcionalmente esta calificación para las alternativas que generen las mayores interferencias, de acuerdo con lo mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 55. Valoración de las interferencias con redes de servicios públicos

GRADO DE INTERFERENCIA	PORCENTAJE ASIGNADO (%)	PUNTAJE ASIGNADO EN LA MATRIZ
<u>Alta</u>	10	<u>2</u>
<u>Alta moderada</u>	25	<u>5</u>
<u>Media</u>	50	<u>10</u>
<u>Media moderada</u>	75	<u>15</u>
<u>Baja</u>	100	<u>20</u>

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Bogotá D.C.

c. Afectación a predios

En función del número de predios afectados con cada alternativa, se otorga el máximo puntaje a la alternativa que afecte la menor cantidad de predios, 0 puntos a la alternativa que afecte la mayor cantidad de predios y proporcionalmente a las alternativas que se encuentren dentro del rango encontrado.

d. Afectación al tránsito vehicular

Teniendo en cuenta que se considera relevante otorgar una calificación a la facilidad de implementación de un plan de manejo de tráfico y la adecuación de los desvíos en el momento de la construcción de la alternativa seleccionada, se asignará máximo puntaje a la alternativa que presente mayor facilidad de implementación y menor puntaje a las alternativas que presenten más dificultad de implementación.

➤ *Variables referidas a la inversión*

Se tendrán en cuenta los costos de inversión, correspondientes a los costos de ejecución de las obras. En éstos se involucran los costos de los predios por adquirir, las compensaciones por desplazamiento de la población afectada, los costos por interferencia de redes y los demás costos de construcción. Con eso se evalúa el alto costo que se derive de alternativas complejas. Se otorgará el 100% del puntaje a la alternativa con menor inversión. Las alternativas restantes se calificarán en forma proporcional.

A continuación se presenta la tabla que resume la matriz multicriterio y la ponderación que se da a cada criterio.

Tabla 56. Matriz multicriterio para vías e intersecciones

AREA	VARIABLES POR EVALUAR	PUNTAJE MÁXIMO	PESO
ASPECTOS URBANO-PAISAJISTICOS	1. IMPLANTACIÓN		150 15%
	a. Aprovechamiento de la infraestructura existente.	60	
	2. CALIDAD DEL DISEÑO		
	a. Interferencias visuales	12,5	
	b. Cambio Volumétrico	12,5	
	c. Generación de espacio público	25	
	d. Afectación al patrimonio arquitectónico	10	

	(instituciones y demás)			
	e. Espacio público con transitabilidad peatonal segura	30		
ASPECTOS DE MOVILIDAD (TRANSITO)	a. Nivel de Servicio Vehicular	25	150	15%
	b. Eficacia en resolución de movimientos	50		
	c. Continuidad en las soluciones no motorizadas	25		
	d. Aumento de la velocidad media de la red	25		
	e. Reducción en el consumo de combustible total en la red	25		
ASPECTOS DE SEGURIDAD VIAL Y PREDISEÑO GEOMETRICO	Grado de dificultad de la maniobra, en función de convergencias, divergencias y/o entrecruzamientos de flujos vehiculares	100	200	20%
	Independencia del flujo peatonal respecto al vehicular. (Máximo 20 puntos si no se consideran facilidades para personas en sillas de ruedas y/o muletas).	100		
ASPECTOS AMBIENTALES	Componente Físico y Biótico	100	100	10%
ASPECTOS SOCIALES	Componente Socioeconómico y sociopredial	100	100	10%
ASPECTOS DE CONSTRUCCION	Riesgos por Inestabilidades generadas	10	100	10%
	Magnitud de interferencias sobre redes de servicios públicos	20		
	Afectación a predios	50		
	Afectación al tránsito vehicular	20		
ASPECTOS PRESUPUESTALES	Inversión	20	200	20%
	TOTAL		1000	100%

Fuente: Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Bogotá D.C.

Tabla 57. Matriz multicriterio diligenciada para cada escenario

VARIABLES A EVALUAR	PUNTAJE MAXIMO	PESO PORCENTUAL	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 5
ASPECTOS URBANO-PAISAJISTICOS	200,00	20,00%	6,20%	10,35%	7,00%	11,00%
1. IMPLANTACIÓN	60,00	6,00%	1,20%	3,60%	3,00%	2,00%
<i>a. Afectación con el entorno</i>	60,00	6,00%	1,20%	3,60%	3,00%	2,00%
2. CALIDAD DEL DISEÑO	140,00	14,00%	5,00%	6,75%	4,00%	9,00%
<i>a. Interferencias visuales</i>	20,00	2,00%	1,00%	1,00%	2,00%	0,00%
<i>b. Cambio Volumétrico</i>	20,00	2,00%	1,00%	1,50%	0,00%	0,00%
<i>c. Generación de espacio público</i>	50,00	5,00%	2,50%	3,75%	2,00%	2,00%
<i>d. Afectación al patrimonio arquitectónico (instituciones y demás)</i>	10,00	1,00%	0,50%	0,50%	0,00%	2,00%
<i>e. Espacio público con transitabilidad peatonal segura</i>	40,00	4,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,00%
ASPECTOS DE MOVILIDAD (TRANSITO)	200,00	20,00%	15,88%	17,75%	7,50%	7,00%
<i>Nivel de Servicio Vehicular</i>	75,00	7,50%	7,50%	7,50%	2,50%	2,00%
<i>Eficacia en resolución de movimientos</i>	50,00	5,00%	4,00%	3,75%	5,00%	4,00%
<i>Continuidad en las soluciones no motorizadas</i>	25,00	2,50%	0,25%	1,50%	0,00%	0,00%
<i>Aumento de la velocidad media de la red</i>	25,00	2,50%	2,50%	2,50%	0,00%	1,00%
<i>Reducción en el consumo de combustible total en la red</i>	25,00	2,50%	1,63%	2,50%	0,00%	0,00%
ASPECTOS DE SEGURIDAD VIAL Y PREDISEÑO GEOMETRICO	100,00	10,00%	10,00%	8,75%	2,50%	0,00%
<i>Grado de dificultad de la maniobra, en función de convergencias, divergencias y/o entrecruzamientos de flujos vehiculares</i>	50,00	5,00%	5,00%	5,00%	2,50%	0,00%
<i>Independencia del flujo peatonal respecto al vehicular. (Si no garantiza el paso seguro de todos los peatones se obtendrá un puntaje máximo de 50 %)</i>	50,00	5,00%	5,00%	3,75%	0,00%	0,00%
ASPECTOS AMBIENTALES	100,00	10,00%	5,50%	7,50%	2,50%	2,50%
<i>Componente Físico y Biótico</i>	100,00	10,00%	5,50%	7,50%	2,50%	2,50%
ASPECTOS SOCIALES	100,00	10,00%	5,00%	3,25%	25,00%	0,00%
<i>Componente Socioeconómico y sociopredial</i>	100,00	10,00%	5,00%	3,25%	25,00%	0,00%
ASPECTOS DE CONSTRUCCIÓN	100,00	10,00%	7,00%	1,25%	1,00%	5,00%
<i>Riesgos por Inestabilidades generadas</i>	10,00	1,00%	0,25%	0,75%	1,00%	2,00%
<i>Magnitud de interferencias sobre redes de servicios públicos</i>	20,00	2,00%	0,5%	0,50%	0,00%	0,00%
<i>Afectación a predios</i>	50,00	5,00%	3,75%	0,00%	0,00%	0,00%

<i>Afectación al tránsito vehicular</i>	20,00	2,00%	3,00%	0,00%	0,00%	3,00%
ASPECTOS PRESUPUESTALES	200,00	20,00%	15,00%	20,00%	15,00%	20,00%
<i>Inversión</i>	200,00	20,00%	15,00%	20,00%	15,00%	20,00%
TOTAL	100,00	100,00%	64,58%	68,85%	60,50%	45,50%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Inversión estimada

INVERSION ESTIMADA				
COMPONENTES	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 5
1. BIENES	\$ 3.656.890.000	\$ 5.134.500.000	\$ 11.753.704.000	\$ 1.959.219.000
2. OBRAS	\$ 2.632.216.000	\$ 4.756.460.000	\$ 25.407.078.000	\$ 2.600.835.000
3. INTERVENTORIA	\$ 689.818.000	\$ 1.075.760.000	\$ 1.652.456.000	\$ 236.442.000
TOTAL	\$ 6.978.924.000	\$ 10.966.720.000	\$ 38.813.238.000	\$ 4.796.496.000

Cabe aclarar que ni en la matriz multicriterio ni en el análisis de inversión estimada se tuvo en cuenta el escenario 1, ya que este implica no realizar ningún tipo de proyecto por tratarse de la situación actual, además los valores de inversión estimada se refieren a con cantidades globales, ya que no se cuenta con el diseño detallado de cada escenario.

Los resultados que arroja la matriz multicriterio muestran como mejor opción la planteada en el escenario 3, es decir la intersección divergente diamante, seguida por la intersección divergente convencional, luego el escenario cuatro de la glorieta a desnivel y por último el tercer carril, mostrando una vez más la efectividad del diseño diamante.

En el caso de la inversión el menor costo lo presenta el escenario 5, seguido del escenario 2, luego el 3 y por último el 4 , se observa en la tabla que el impacto más grande lo genera el ítem llamado bienes, que se refiere al aspecto predial en cada intervención.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El análisis hecho en esta investigación ha permitido dar a conocer una alternativa nueva de diseño de intersección vial para ciudades latinoamericanas, que al parecer se está desaprovechando por su desconocimiento.

Aunque el principio básico de operación consiste en la inversión de los sentidos viales, el trasfondo de su funcionamiento va mucho más allá, pudiendo llegar a convertirse en una solución efectiva y de bajo costo, ideal para ciudades de nuestro medio, donde la tasa de inversión en nueva infraestructura vial es a veces muy baja.

Los resultados arrojados en este análisis permitieron identificar seis modelos que caracterizan la operación de este tipo de intersecciones, cuatro de ellos no tuvieron incidencia en la investigación ya que dependen equipos especiales de control en tiempo real, que para las condiciones de la ciudad caso de estudio, no resultan viables, por eso se trabajó solo con dos modelos, ellos fueron el IDIRMS y el DRIVE, su diferencia radica principalmente en la consideración de un flujo de sobresaturación, que para el caso del DRIVE afecta todo el esquema metodológico en el que se fundamenta este modelo, situación que no ocurre en el modelo IDIRMS.

Una vez identificados estos modelos, se establecieron los diferentes escenarios con la respectiva calibración del modelo base, esta calibración permitió verificar el acierto que se tuvo en la selección del software de microsimulación, ya que este brinda las herramientas necesarias para la evaluación de cada una de estas alternativas, además la entrega de resultados es muy favorable, ya que permite obtener parámetros que son fundamentales para los dos modelos escogidos.

El haber establecido no solo los escenarios de la intersección diamante convencional y la divergente diamante, sino tener otras alternativas de solución como fue la glorieta a desnivel y el tercer carril, permitió hacer una comparación entre diferentes opciones, con lo cual se pudo dimensionar mucho más el impacto de estas alternativas de diseño, obteniéndose resultados tales como mejoramientos en las velocidades promedio de operación en las intersecciones semaforizadas de casi un 30%, además de mejoramientos en el nivel de servicio de algunos corredores viales de la zona de estudio.

Como lo que se buscaba era una solución integral que impactara positivamente en lo posible la mayor área posible de la zona de influencia, se pudo observar que las soluciones planteadas en el escenario 4 y 5 ofrecían ventajas pero solo para la intersección particular donde se ubicaban, sin ofrecer ninguna mejora en la zona adyacente a cada propuesta, situación que no ocurre con las intersecciones diamante, según los resultados obtenidos estas tienen un impacto sobre los corredores cercanos, expresado en disminución de los tiempos de viajes, disminución de las longitudes de cola y tiempos de parada de los vehículos.

Otro factor importante identificado en la operación de estas intersecciones es la operación semafórica, se resalta mucho en la literatura el uso en este tipo de intersecciones de los esquemas de tres y cuatro fases para la intersección diamante convencional (DI) y el esquema de dos fase para el divergente diamante (DDI). Estos esquemas resultaron favorables para las condiciones de flujos vehiculares que se presentan en la intersección seleccionada para estudio, ya que el total de ardas de la malla de simulación generada presento una disminución de más de un 40% para el escenario 3 y el escenario 5, en una proporción menor entre el 10% y el 20 % para los escenarios 2 y 4, lo cual muestra la efectividad en la regularización del flujo por el ajuste de las fase semafóricas para el caso de los escenarios 2 y 3, en el caso de escenario 5, este fenómeno es favorable debido a la eliminación del semáforo en la intersección en estudio.

Como el análisis hecho a cada escenario planteado no se basó únicamente en resultados operacionales y relacionados con la demanda, sino que también se realizó un análisis desde otras perspectivas como fueron la urbana, la social, la ambiental y la económica, se pudo identificar otros aspectos tanto favorables como desfavorables de estas intersecciones.

En cuanto a lo urbano y lo ambiental el impacto no es tan fuerte debido a que la intervención es mínima, situación que no ocurre con el escenario 5, ya que la implementación del tipo de infraestructura que allí se plantea, genera un impacto visual grande sobre las personas, además modifica todo el paisaje del sector.

En el aspecto económico, aunque la evaluación que se hizo se basó en cantidades globales, ya que no se cuenta en la actualidad con los diseños detallados de cada uno de los escenarios, se pueden tomar los valores obtenidos como una buena aproximación. Es por ello que la implementación de estas soluciones es relativamente barata, la principal causa de este efecto es la baja intervención predial que se da en los sectores de aplicación de estas soluciones y que contrasta con la alternativa del escenario 5 donde la afectación predial es demasiado grande abarcando un 30% del total del presupuesto, es por esto que estas intersecciones se vislumbran como una alternativa de solución eficaz y de bajo costo, pero que no resultara en una solución definitiva, pues como se vio en la proyección de resultados a 5 , 10 y 20 años, el deterioro es alcanzado al llegar a los 10 años de operación, con lo cual se concluye que este tipo de soluciones son medidas parciales, que les dan un tiempo a las administraciones locales para la búsqueda de recursos para la realización de una obra de infraestructura de mayor envergadura que permita una solución definitiva al problema.

Una de las desventajas o inconvenientes encontrada en este tipo de soluciones, es el impacto que tienen en relación al cambio del esquema mental de operación de los peatones, esto se debe al cambio de sentidos viales, lo cual puede generar

confusiones al peatón y al conductor, generando que la accidentalidad se aumente si no se cuenta con una señalización adecuada y medidas de protección al peatón.

Como conclusión final se puede decir que este tipo de intersecciones ofrecen unas condiciones operacionales que las hacen adecuadas para su uso en ciudades colombianas, pero que no se convierten en alternativas definitivas ya que como toda infraestructura vial tiene su periodo de vida útil, además no se puede desconocer el fenómeno de crecimiento del parque automotor que están viviendo las ciudades colombianas.

El plantear una solución definitiva y eficaz tiene que ir acompañada de medidas de gestión de la demanda, ya que como se mencionó en esta investigación, el hecho de tener más vías no implica que el problema se vaya a solucionar, es por todo esto que es muy adecuado terminar con esta frase de un autor anónimo acerca de lo que es la movilidad “Comprender la movilidad y los desplazamientos significa también comprender la ciudad y así mismo a quienes la habitan”

6.1. FUTURAS INVESTIGACIONES

Con el ánimo de seguir profundizando en este tema y revisar los temas que en esta investigación no se trataron, resulta conveniente profundizar en las siguientes líneas de investigación que permitan un conocimiento más detallado del comportamiento de este tipo de intersecciones.

➤ *Análisis de la operación peatonal en intersecciones diamante*

Se busca establecer los parámetros para el manejo de peatones en este tipo de intersecciones y como puede esto afectar a los modelos existentes de operación semafórica en estas intersecciones.

➤ *Programa de seguridad vial y manejo adecuado de señalización para este tipo de intersecciones.*

Como se ha mencionado una de las principales desventajas de estas soluciones es el hecho de que el conductor se sienta conduciendo en el lado opuesto de la vía, lo cual genera un grado de desconfianza que puede resultar en accidentes, incluso para el mismo peatón que también se ve enfrentado a este nuevo esquema, esta línea de investigación partiría del hecho del impacto al conductor y al peatón por el cambio de sentido en una sección de un determinado eje vial, lo cual genera la necesidad de contar con planes de seguridad vial que permitan mitigar estos impactos negativos.

➤ *Optimización semafórica en corredores urbanos*

Poder plantear modelos analíticos de optimización semafórica que permita mejorar la movilidad urbana en corredores viales de una ciudad

➤ *Análisis de efectividad de la solución en otras ciudades colombianas*

Realizar un análisis que permita medir la efectividad según las condiciones particulares y parámetros operacionales de otras ciudades colombianas.

➤ *Medidas alternativas para la gestión de la demanda*

Se busca establecer condiciones para el manejo adecuado de la demanda, que permita generar condiciones adecuadas de movilidad urbana.

REFERENCIAS

- [1] Libro Verde, Hacia una cultura de la movilidad urbana, Comisión de las comunidades europeas, Bruselas 2007, página 4.
- [2] Libro Blanco, El transporte como soporte al desarrollo del país, una visión al 2040, Universidad de los Andes, Colombia, 2008.
- [3] Propuesta de un sistema de indicadores de sostenibilidad para la movilidad y el transporte urbanos. Aplicación mediante sig a la ciudad de Alcalá de Henares. M^a ángeles Díaz Muñoz*, Carolina C. Cantergiani. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. 2007, página 36.
- [4] TORRES, C. (2005), Ciudad Informal y Movilidad. <http://www.ciudad-derechos.org/espanol/pdf/eeq.pdf>.
- [5] CODHES, ACNUR. Desplazamiento Forzado interno en Colombia: Conflicto, Paz y Desarrollo. Bogotá. Colombia. 2001. Citado en TORRES, C. Ciudad Informal y Movilidad. <Http://www.ciudad-derechos.org/espanol/pdf/eeq.pdf>. Octubre de 2.005.
- [6] DUQUE, G. (2006), Movilidad y Desarrollo en el Eje Urbano y Periurbano de Manizales. Fundamentos de Economía y Transportes. <http://www.galeon.com/ctseconomia/regionalizacion.htm>.
- [7] Diego Alexander Escobar García (2208), Instrumentos y metodología de planes de movilidad y transporte en las ciudades medias colombianas, Universidad politécnica de Cataluña, Departamento de Infraestructuras del Transporte y del Territorio, tesis doctoral, Capítulo 3, Barcelona.

[8] GANNON, Colin; LIU, Zhi, (1997), "Poverty and Transport", en *Transport Infrastructure Notes*, núm. TWU-30, World Bank.

[9] MINISTERIO DE TRANSPORTE, *El transporte en cifras - 2004*, Ministerio de Transporte, Bogotá, julio de 2004.

[10] CÁRDENAS, Mauricio; ESCOBAR, Andrés; GUTIÉRREZ, Catalina, (2005), "La contribución de la infraestructura a la actividad económica en Colombia 1950-2004", pp. 139-187.

[11] Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá: Retos y realidades, Ricardo Montezuma, Bogotá, Colombia 2003.

[12] Observatorio de la movilidad metropolitana, Centro de Investigación del Transporte, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 2008.

[13] Primer informe de progreso: Estado del arte sobre gestión de la demanda de movilidad. Foro gestión demanda movilidad – Eusko Ikaskuntza

[14] J. Rouwendal and E. Verhoef. "Basic economic principles of road pricing: From theory to applications". *Transport Policy*, Vol. 13, No. 2, March 2006, pp. 106-114.

[15] Salas Rondón, Miller, Gestión de la movilidad mediante tarifas. *Revista de Ingeniería*, Universidad de los Andes, núm. 29, mayo, 2009, pp. 129-136. Colombia

[16] Salas R. Miller; Robusté A. Francesc y Saurí M. Sergi, Evaluación de efectos al implantarse una estructura tarifaria combinada sobre una red de vías metropolitanas congestionadas.

redpgv.coppe.ufrj.br/index.php?option=com_docman.

[17] Manual de señalización vial, Ministerio de Transporte, Republica de Colombia, 2004, Pagina 271 - 274

[18] Roadway Design Manual, Texas Department of Transportation, March 2009, pag 57.

[19] B. de Schutter and B. de Moor, (1998) "Optimal traffic light control for a single intersection", European Journal of Control, vol. 4, nº 3, pp. 260-276.

[20] Diazlvorra, M^a C.; (2001). "Tratamiento de intersecciones mediante regulación semafórica". Trabajo Fin de Carrera Ingeniería Civil. Alicante (España).

[21] Iswalt, Michael V. and David Stanek. Signalizing Roundabouts: Managing Traffic Flows to Increase the Capacity of Multi-lane Roundabouts. Institute of Transportation Engineers District 6 Annual Meeting, 2006.

[22] Manual de diseño geométrico de carreteras, 2008, Ministerio de Transporte, República de Colombia

[23] Siromaskul, P.E, Smith, (2007, Julio). Diverging Diamond Interchanges: Oregon's Planned Applications, Presentation for the ITE District 6 Meeting, Portland, OR.

[24] Stanek, P.E, David. (2006). Innovative Diamond Interchange Designs: How to Increase Capacity and Minimize Cost, Roseville.

[25] Sunkari, R. Srinivasa. (2000, septiembre) Urbanik.signal design manual for diamond interchanges, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, Austin-Texas.

[26] Chlewicki, Gilbert, C. (2003) New Interchange and Intersection Designs: The Synchronized Split-Phasing Intersection and the Diverging Diamond Interchange. Jacobs Civil Inc. Baltimore, Maryland.

[27] Edara, K. Praveen y Bared, G. Joe. (2003). Diverging Diamond Interchange and Double Crossover Intersection – Vehicle and Pedestrian Performance, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

[28] SIGNAL DESIGN MANUAL FOR DIAMOND INTERCHANGES, Srinivasa R. Sunkari and Thomas Urbanik II, P.E.. (2000). Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas 77843-3135.

[29] Mirchandani, Pitu y Head, Larry. (2000, junio). Real Time Traffic Signal Control system: Architecture, Algorithms and Analysis, Department of Systems and Industrial Engineering, University of Arizona. Tucson – Arizona.

[30] Sharma, Siddhartha y Chatterjee, Indrajit (2005). Comparative Analysis of Conventional Diamond Interchange and Contra Flow Left Turn (CFL) Interchange, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Missouri, Columbia.

[31] Zagrawal, Ashish. y Hickman Mark. (2004, octubre).Automated Extraction of Queue Lengths from AirboneImagery.Intelligent Transportation Systems Conference, Washington D.C.

[32] Zimmerman, Karl y Bonneson, James. (2008, septiembre) DEVELOPMENT OF A TRAFFIC SIGNAL OPERATIONS HANDBOOK, Texas Transportation Institute the Texas A&M University System.

[33] Chen, C.-H., Chang, G.-L. (2003). A dynamic real-time incident detection system for urban arterials: systemarchitecture and preliminary results, In: Proceedings of the Paci@c Rim TransTech Conference, vol. 1, pp. 98±104

[34] Zongzhong, Tian. (2004, febrero).Modeling and Implementation of an Integrated Ramp Metering-Diamond Interchange Control System; Department of Civil and Environmental Engineering University of Nevada, Reno, USA.

[35] J. nelson, darcy bullock, and tom urbanik. (2000). Implementing actuated control of diamond interchangesbyeric. Urban Transportation Division.

[36] WARRICK David y SIROMASKUL Smith, (2007). Diverging Diamond Interchanges: Oregon's Planned Applications, Presentation for the ITE District 6 Meeting, Portland, OR

[37] DE CAMP, G. B. (2003). "A primer on diamond interchanges." TexITE News, Texas Section of Institute of Transportation Engineers, Houston.

[38] EDARA, K. Praveen, BARED, G. Joe; (2003). Diverging Diamond Interchange and Double Crossover Intersection – Vehicle and Pedestrian Performance , Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

[39] H.J.C. Huijberts and J.H. van Schuppen, (1995). "Routing control of a motorway network: A summary", Proceedings of the 3rd European Control Conference (Rome, Italy), pp. 781-784.

- [40] J.J. Sánchez, M.J. Galán and E. Rubio, (2008). "Evolutionary Computation applied to Urban Traffic Optimization" in *Advances in Evolutionary Algorithms*, Vienna, Austria: WitoldKosinski.
- [41] M. El Asaway and T. Sayed, (2007). Comparison of Two Unconventional Intersection Schemes: The Crossover Displaced Left-Turn (XDL) Intersection and the Upstream Signalized Crossover (USC) Intersection. 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- [42] Wu, N., and Z. Tian. (2003). Determination of Probability of No Disruption and Freeway Volume Threshold for Ramp Metering Based on Gap Acceptance Theory. Submitted to *Journal of Transportation Research*, Part B.
- [43] Webster, F.V., and B.M. Cobbe (1999). *Traffic Signals*. Her Majesty's Stationery Office, London.
- [44] Tian, Z., K. Balke, R. Engelbrecht, and L. Rilett. (2002). Integrated Control Strategies for Surface Street and Freeway Systems. In *Transportation Research Record 1811*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 92-99.
- [45] Lawson, T.W., D.J. Lovell, and C.F. Daganzo. (1999). Using Input-Output Diagram to Determine Spatial and Temporal Extents of a Queue Upstream of a Bottleneck. In *Transportation Research Record 1572*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. pp. 140-147.
- [46] McShane, W.R., R.P. Roess, and E.S. Prassas (1998). *Traffic Engineering*, 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

- [47] Wagner, F.A., F.C. Barnes, and D.L. Gerlough. (2001) *NCHRP Report 124: Improved Criteria for Traffic Signal Systems in Urban Networks*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [48] Lipp, L.E., L.J. Corcoran, and G.A. Hickman. (2001). Benefits of Central Computer Control for Denver Ramp-metering System. In *Transportation Research Record 1320*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 3-6.
- [49] McNally, M.G., J.E. Moore, and C.A. MacCarley. (2001). *Documentation of the Irvine Integrated Corridor Freeway Ramp Metering and Arterial Adaptive Control Field Operational Test*. Report UCB-ITS-PRR-2001-2. California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, Berkeley.
- [50] Messer, C.J. (2003). *Advanced Freeway System Ramp Metering Strategies for Texas*. Report 1232-23. Texas Transportation Institute, College Station, Texas.
- [51] Papageorgiou, M., H. Hadj-Salem, and J. Blosseville. (2001). ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering. In *Transportation Research Record 1320* Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 58-64.
- [52] Papageorgiou, M., and E. Smaragdis (2003). A Series of New Local Ramp Metering Strategies. In *Transportation Research Board 82nd Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM*, Washington, D.C.
- [53] Oh, H., and V.P. Sisiopiku. (2002). A Modified ALINEA Ramp Metering Model. In *Transportation Research Board 81st Annual Meeting Compendium of Papers CDROM*,

Washington, D.C.

[54] Hurdle, V.F., and B. Son. (2001). Shock Wave and Cumulative Arrival and Departure Models. In *Transportation Research Record 1776*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 159-166.

[55] Mahendran A. Kumar. (2009). Application of nontraditional interchange treatments to improve quality of service and preserve the service life of narrow over- and underpass roadways, Tennessee Technological University.

[56] Pinnell, C., D.R. Drew, W.R. McCasland, and J.A. Wattleworth (1999). *Evaluation of Entrance Ramp Control on a Six-Mile Freeway Section*. Texas Transportation Institute, College Station, Texas.

[57] Gartner, N. (1999). Microscopic Analysis of Traffic Flow Patterns for Minimizing Delay on Signal-Controlled Links. In *Highway Research Record 445*, Highway Research Board, Washington, D.C., pp. 12-23.

[58] *FREQ10, Version 10, Release 3.0*. California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, Berkeley, 2002.

[59] Messmer, A. *NETANET (2000). A Simulation Program for Motorway Networks*. Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, Chania, Greece.

[60] Payne, H. (1997). Models of Freeway Traffic and Control. In *Mathematical Models of Public Systems*, La Jolla, California: Simulation Councils, Inc., pp. 51-61.

- [61] Banks, J.H. (2001). The Two-Capacity Phenomenon: Some Theoretical Issues. In *Transportation Research Record 1320*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 234-241.
- [62] Daganzo, C.F. *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*. Elsevier Science Inc., New York, pp. 133-135, 2007.
- [63] Persaud, B., S. Yagar, D. Tsui, and H. Look. (2001). Breakdown-Related Capacity for Freeway with Ramp Metering. In *Transportation Research Record 1748*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 110-115.
- [64] Vamp, Gerard B. (1993). A primer on diamond interchanges. The first meeting of IVHST Texas. Texas, USA. 15 – 17, Noviembre.
- [65] Hall, F.L., and K. Agyemang-Duah. (1991). Freeway Capacity Drop and Definition of Capacity. In *Transportation Research Record 1320*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 91-98.
- [66] Cassidy, M.J., and R.L. Bertini. (1999). Some Traffic Features at Freeway Bottlenecks. *Transportation Research*, Part B, Vol. 33, pp. 25-42.
- [67] Banks, J.H. (2006). Two-Capacity Phenomenon at Freeway Bottlenecks: A Basis for Ramp Metering? In *Transportation Research Record 1320*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 83-89.
- [68] Ringert, J., and T. Urbanik. (2004). Study of Freeway Bottlenecks in Texas. In *Transportation Research Record 1398*, Transportation Research Board, National

Research Council, Washington, D.C., pp. 31-41.

[69] Zongzhong, Tian. (2004). Modeling and Implementation of an Integrated Ramp Metering-Diamond Interchange Control System; Department of Civil and Environmental Engineering University of Nevada, Reno, USA.

[70] Dixon, M.P., and L.R. Rilett. (2002). Real-Time OD Estimation Using Automatic Vehicle Identification and Traffic Count Data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 17, Issue 1, pp 7-21.87. Mountain, L.J., and P. Westwell. The Accuracy

[71] Cassidy, M.J., S.B. Anani, and J.M. Haigwood. (2002). Study of Freeway Traffic Near an Off-Ramp. *Transportation Research, Part A*, Vol. 36, No. 6, pp. 563-572.

[72] Hadj-Salem H., Davee M.M., Blosseville J. M. and Papageorgiou . (2002). M. ALINEA: Un Outil de Regulation d'Acces IsolC sur Autoroute". Report INRETS No.80, Arcueil, France.

[73] M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos and Y. Wang. (2003). "Review of road traffic control strategies". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 12, pp. 2043–2067.

[74] M. Papageorgiou, M. Ben-Akiva, J. Bottom, P. Bovy, S. Hoogendoorn, N. Hounsell, A. Kotsialos and M. McDonald. (2007). "ITS and Traffic Management, ser". *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Vol. 14, Ch. 11 pp. 715–774.

[75] M. Cremer and M. Papageorgiou.(1981). "Parameter identification for a traffic flow model". *Automatica*, Vol. 17, No. 6, pp. 837–843.

- [76] K. Aboudolas, M. Papageorgiou and E. Kosmatopoulos. (2007) "Control and optimization methods for traffic signal control in large-scale congested urban road networks". *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, pp. 3132–3138.
- [77] A. Al-Mudhaffar. (2006). *Impacts of traffic signal control strategies*. Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology.
- [78] R. Allsop (1991). "SIGSET: A computer program for calculating traffic signal settings". *Traffic Engineering and Control*, Vol. 12, No. 2..
- [79] M. Dotoli, M. Fanti and C. Meloni (2006). "A signal timing plan formulation for urban traffic control". *Control Engineering Practice*. Vol. 14, No. 11, pp. 1297–1311.
- [80] M. Crabtree and R. Vincent. (1998) "Bus priority in mova" *Road Transport Information and Control*, 9th International Conference on (Conf. Publ. No. 454), April 1998, pp. 85–89.
- [81] D. Robertson and R. Bretherton. (1991). "Optimizing networks of traffic signals in real time-the scootmethod". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 40, No. 1 Part 2, pp. 11–15.
- [82] M. El Asaway and T. Sayed, (2007). Comparison of Two Unconventional Intersection Schemes: The Crossover Displaced Left-Turn (XDL) Intersection and the Upstream Signalized Crossover (USC) Intersection. 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- [83] Plan maestro de movilidad Bucaramanga 2011 - 2030

[84] Cuarto estudio sociodemográfico de usuarios de motos en Colombia. Las motos, salidas del desarrollo industrial y económico de Colombia. Comité de Ensambladoras de Motocicletas Japonesas. Abril de 2009.

[85] Manual de Transporte Bogotá en su capítulo 5 *“Estudios de Tránsito para Tránsito Vehicular”*
<http://www.minproteccionsocial.gov.co/vbecontent/library/documents/DocNewsNo15584DocumentNo6125.PDF>.

[86] Astroads research report (2006). The Use and Application of Microsimulation Traffic Models.

[87] Contrato interadministrativo CI-INF No. 099/2009 suscrito entre el municipio de Bucaramanga Y L A Universidad Industrial de Santander.

[88] VELASCO, L. M. (2004). Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: Getram en Santiago. Tesis de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile.

[89] SHAABAN, K. S., RADWAN, E. (2005). A calibration and validation procedure for microscopic simulation model: a case study of sim traffic arterial streets. In: Proceedings of the 84rd TRB Annual Meeting, Washington, DC.