



Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte

Tránsito

Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte

Tránsito



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
Secretaría
TRÁNSITO Y TRANSPORTE

C&M
Cal y Mayor y Asociados

Bogotá, D.C., Colombia, octubre de 2005

*Manual de Planeación y Diseño para la
Administración del Tránsito y el Transporte*

Primera edición: 1998

Segunda edición: octubre de 2005

Tomo III. Tránsito

**Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.
Secretaría de Tránsito y Transporte**

Secretario de Tránsito y Transporte	Carlos Eduardo Mendoza Leal
Subsecretario técnico	Heriberto Triana Alvis
Interventor	William Fernando Camargo Triana
ISBN	958-97712-2-x
	Contrato 133 de 2004
	Bogotá, D.C., octubre de 2005

Dirección editorial, diseño y diagramación	Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería Avenida 13 No. 205-59
Directora editorial	Jimena Lemoine Garzón
Coordinación editorial	Jorge Cañas Sepúlveda
Diseño de carátula	Luisa Fernanda Manrique
Impresión digital	Logoformas S.A.



MANUAL DE PLANEACIÓN Y DISEÑO PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL TRÁNSITO Y EL TRANSPORTE



CONTENIDO GENERAL

RECONOCIMIENTOS	IX
AGRADECIMIENTOS	XI
PRESENTACIÓN	XIII
INTRODUCCIÓN	XIX
RESUMEN	XXI
CAPÍTULO 1. CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO DEL TRÁNSITO NO MOTORIZADO	
1.1 Peatones	1-7
1.2 Ciclorrutas	1-34
Referencias bibliográficas	1-44
CAPÍTULO 2. CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO, FLUJO CONTINUO	
2.1 Evolución y filosofía del HCM	2-7
2.2 Definiciones	2-11
2.3 Corrientes vehiculares continuas	2-13
Referencias bibliográficas	2-82
CAPÍTULO 3. CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO, FLUJO DISCONTINUO	
3.1 Intersecciones controladas con semáforo	3-7
3.2 Intersecciones de prioridad con señal de “pare”	3-24
3.3 Glorietas	3-38
3.4 Arterias urbanas	3-54
Referencias bibliográficas	3-74
CAPÍTULO 4. PROGRAMAS DE INGENIERÍA DE TRÁNSITO	
4.1 Software para la planeación y evaluación (HCS 2000)	4-9
4.2 Software para la evaluación y la optimización	4-46
4.3 Software para la microsimulación	4-70
Referencias bibliográficas	4-102
CAPÍTULO 5. ESTUDIOS DE CAMPO PARA TRÁNSITO VEHICULAR	
5.1 Volúmenes de tránsito en tramos viales	5-5
5.2 Volúmenes de tránsito direccionales	5-7
5.3 Volúmenes de tránsito en estaciones maestras	5-12
5.4 Velocidad puntual	5-13

5.5	Tiempo de reocrido por el método del vehículo en movimiento	5-20
5.6	Tiempo de recorrido por el método de las placas de matrícula	5-29
5.7	Tiempo de detención en intersecciones controladas por semáforo	5-32
5.8	Ocupación vehicular	5-38
	Referencias bibliográficas	5-41

CAPÍTULO 6. ESTUDIOS DE CAMPO USUARIOS

6.1	Estudio del comportamiento de los conductores ante los dispositivos del control del tránsito	6-5
6.2	Estudios de peatones	6-13
6.3	Estudios para bicicletas	6-33
	Referencias bibliográficas	6-40

RECONOCIMIENTOS

De la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá

Dr. Carlos Eduardo Mendoza Leal	:	Secretario de Tránsito y Transporte (STT)
Dr. Heriberto Triana Alvis	:	Subsecretario técnico de la STT
Esp. Luis Eduardo Acosta Medina	:	Asesor Subsecretaría Técnica
Esp. Betty Luz Castro Morales	:	Asesor Subsecretaría Técnica
Esp. William Fernando Camargo Triana	:	Interventor
Esp. Elber Pérez Walteros	:	Interventor
Esp. Martha Constanza Coronado Fajardo	:	Supervisora. Toma de información parámetros tránsito
Esp. Juan Carlos Montenegro Arjona	:	Semaforización Electrónica
Esp. Ricardo José Peña Lindarte	:	Estacionamientos
Ing. Luis Manuel Puentes Vega	:	Asesor Subsecretaría Técnica

Del consultor (Cal & Mayor y Asociados, S.C.)

MSc. Marcos Noguerón	:	Director de Consultoría C&M
Esp. Jenny Landaeta Espinosa	:	Gerente de proyecto
MSc. Santiago Henao Pérez	:	Director del proyecto
MSc. Óscar Salcedo Yusti	:	Aseguramiento de la calidad
MSc. Mauricio Carvajal Benítez	:	Especialista general y líder del desarrollo del <i>Manual</i>
MSc. James Cárdenas Grisales	:	Asesor en Ingeniería de Tránsito
MSc. Marco Antonio Hinojosa	:	Asesor en Planeación del Transporte
PhD. Domingo Ernesto Dueñas	:	Asesor en Transporte Público
Ing. Jean Christian Trujillo Gómez	:	Asesor en Modelación del Transporte
MSc. Luis Ángel Guzmán	:	Ingeniero de apoyo. Calibración de Parámetros del Tránsito y Métodos
Esp. Nidia Castellanos Acosta	:	Ingeniero de apoyo. Transporte Público
Esp. Maritza Villamizar Roperio	:	Ingeniero de apoyo. Seguridad Vial
Esp. Edna Rodríguez Alemán	:	Ingeniero de apoyo. Seguridad Vial y Glosario
Esp. Pedro Julián Gómez Higuera	:	Ingeniero de apoyo. Tránsito
Esp. Andrés Felipe Guzmán Valderrama	:	Ingeniero de apoyo. Modelos y Planeación del Transporte

AGRADECIMIENTOS

Como soporte técnico para mejorar la normalización y estandarización de procesos de contratación, supervisión y ejecución de estudios y monitoreos al tránsito, relacionados con la planeación, diseño, operación y mantenimiento de proyectos y elementos del tránsito y transporte de la capital del país, la Alcaldía de Bogotá, a través de la Secretaría de Tránsito y Transporte, se comprometió con la actualización del *Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte* versión 1998, que contribuirá al desarrollo organizado, sostenible y armónico de la ciudad y del país, esperando trascender las fronteras y llegar a nuestros países vecinos, por tratarse de un esfuerzo pionero en esta región del mundo.

Cal & Mayor y Asociados, S.C., empresa consultora encargada de la ejecución de este trabajo, manifiesta su profundo agradecimiento a todas las personas y entidades que de una u otra manera contribuyeron positivamente en la actualización del *Manual*, en especial a la Alcaldía de Bogotá, la Secretaría de Tránsito y Transporte, al Instituto de Desarrollo Urbano, el Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Transmilenio, así como a la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia en Tunja, la Universidad de los Andes y la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Se agradece muy especialmente al grupo consultor “Consorcio Movilidad Urbana 2004”, constituido por las empresas consultoras presididas por los ingenieros consultores Alfredo Ardila Ariza y Sergio Pabón Lozano, quienes a través de un contrato de toma de datos de campo con la STT, obtuvieron la mayor parte de los datos necesarios para la calibración de parámetros de tránsito, con excepción de la determinación de los límites de los niveles de servicio para vías multicarriles en el contexto urbano y el factor de ajuste para obstrucción de peatones en giro derecho en intersecciones semaforizadas, estudios que realizó directamente la empresa Cal & Mayor y Asociados.

Agradece también a su grupo de profesionales y asesores, con especial mención para el doctor Guido Radelat Egües quien además de su reconocida experiencia en el ámbito mundial e indiscutible calificación profesional y humana, aportó la concepción general del manual anterior. Adicionalmente se da gracias al ingeniero Domingo Ernesto Dueñas por sus aportes, los cuales representan muchos años de investigación en el tema del transporte público y generan un importante soporte técnico y una visión fresca sobre el tema.

Por otro lado, agradecemos la participación en los talleres de divulgación de profesionales, consultores independientes y empresas,

así como también de entidades públicas, ya que sus valiosos aportes, recomendaciones y sugerencias sirvieron para terminar de estructurar y consolidar la primera actualización del *Manual*. Especialmente se agradece la información suministrada por el ingeniero Richard Blanco, del Instituto de Desarrollo Urbano, encargado de proyectos en el área de ciclorrutas, y al licenciado Óscar Ruiz Brochero, jefe de la

oficina de recreación del Instituto Distrital para la Recreación y el Deporte.

Estas personas, con su dedicación y experiencia, elaboraron una obra de calidad internacional, que será de gran utilidad para el medio latinoamericano y que, sin duda, constituye un orgullo y ejemplo de alta gestión de la administración distrital.

PATRICIO CAL Y MAYOR LEACH
PRESIDENTE

PRESENTACIÓN

La actualización del HCM (*Highway Capacity Manual, Manual de capacidad de autopistas*) en su versión 2000, fue uno de los aspectos fundamentales en el dimensionamiento general de la presente actualización, ya que se constituye en el *Manual* de mayor consolidación teórica y conceptual, así como también en el de mayor utilización en nuestro medio. En este sentido, se recopilan los conceptos y metodologías más importantes, coherentes con los estipulados en el HCM 2000; aunque las condiciones de nuestro medio y entorno son diferentes de las propias del medio en que se desarrollan manuales como el HCM 2000, los conceptos y metodologías son de carácter universal y lo que se requiere principalmente son procesos de adaptación metodológicos y en los parámetros de tránsito. Por tal razón se incluyeron los de mayor relevancia en el funcionamiento del tránsito local y en las nuevas condiciones del sistema de transporte de Bogotá, y por consiguiente algunas adaptaciones metodológicas contenidas en el HCM 2000, especialmente en el tema de calibración de parámetros, glorietas, peatones y ciclorrutas.

Las condiciones del tránsito y el transporte de Bogotá han cambiado en los últimos años debido a las nuevas obras de infraestructura desarrolladas por la administración distrital y también por la modernización del sistema de

transporte público de la ciudad, especialmente con la entrada en operación de Transmilenio, la ejecución e implantación de la reorganización del transporte público colectivo y la construcción de ciclorrutas como elemento vital y futuro del sistema complementario de transporte.

El *Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte* sirve como soporte y referencia para el desarrollo de los contratos de toma de datos que realiza la entidad periódicamente, y en general se convierte en la herramienta local en la planeación, concepción, desarrollo y supervisión de estudios relacionados con el sistema de transporte de la ciudad.

Es importante anotar que la presente actualización se hizo mediante contrato 133 del 2004, suscrito entre la STT y la empresa consultora Cal & Mayor y Asociados.

A continuación se describen los objetivos, el alcance y la estructura del *Manual*.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente *Manual* es fortalecer los procesos de planificación, diseño, ejecución, supervisión de estudios, seguimientos y monitoreos al sistema de transporte urbano, elementos básicos para la planeación y diseño de la administración del tránsito y transporte urbano, aplicados al contexto de

Bogotá, a través de la presentación general y particular de los temas específicos relacionados con los sistemas de transporte.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♦ Dar a conocer conceptos generales y específicos de la mayor actualidad utilizados en la planeación, diseño, ejecución y supervisión de estudios relacionados con la ingeniería de tránsito y del transporte, como guía para los usuarios potenciales que en una u otra forma deben atender cotidianamente la resolución de problemas en este campo.
- ♦ Brindar lineamientos y aspectos técnicos relacionados con las metodologías, modelos, programas, parámetros y estudios que se deben tener en cuenta en el proceso de planeación del transporte urbano.
- ♦ Dar a conocer los lineamientos y aspectos técnicos relacionados con metodologías para la determinación de la capacidad, calidad y niveles de servicio en sistemas de tránsito y transporte público. Se incluyen también las guías o tutoriales de los programas de mayor utilización, especialmente para el cálculo de la capacidad y niveles de servicio en los elementos de mayor importancia del sistema de transporte, lineamientos generales para el desarrollo de estudios de tránsito y transporte público, entre éstos los estudios de campo necesarios para la determinación y caracterización de la oferta y demanda, al igual que los lineamientos generales para el cálculo de tarifas.
- ♦ Ofrecer los lineamientos y aspectos técnicos relacionados con los conceptos y métodos para la evaluación de la seguridad vial, metodologías para la identificación y estudio de sitios, corredores y sectores peligrosos y medidas para el mejoramiento del sistema de transporte, destacando la descripción de las técnicas de tráfico calmado y cruces pompeyanos, usadas principalmente para mitigar el impacto de la accidentalidad.
- ♦ Calibración de estándares y parámetros de tránsito propios para la ciudad de Bogotá, utilizados fundamentalmente para etapas de planeación del transporte, referentes a los siguientes temas:
 - Estimación de las variables del tránsito para la determinación de la velocidad a flujo libre en vías multicarriles y vías arterias, y los límites de velocidad que definan criterios para los niveles de servicio en vías multicarriles.
 - Estimación de las variables del tránsito para la determinación del flujo de saturación básico y las variables que inciden en la pérdida de eficiencia dada por condiciones como tiempos perdidos por arranque y despeje, por presencia de vehículos pesados, maniobras de estacionamiento, operación de buses y presencia de peatones en giros derechos.
 - Estimación de las variables para la determinación de brechas críticas y tiempo de seguimiento para intersecciones de prioridad reguladas con señales de pare.
 - Estimación de variables del tránsito de peatones, como volúmenes y velocidades, para la determinación de los criterios de niveles de servicio, según el tipo de estructuras o facilidades peatonales como andenes, escaleras, rampas, estaciones y cruces peatonales.
 - Estimación de volúmenes en glorietas para la determinación de las relaciones entre las tasas de flujo máxima por acceso y la tasa de flujo correspondiente al tránsito predominante en la glorieta.

- Estimación de los criterios que determinan los niveles de servicio en este tipo de infraestructura.
- Estimación de flujos de saturación típicos para la ciudad de Bogotá, incluyendo buses articulados.

ALCANCES DEL *MANUAL* Y PROCESO DE ACTUALIZACIÓN

El sistema de transporte urbano en Bogotá se ha transformado con cambios estructurales, siendo relevante que se incluyan en el *Manual* los cambios de mayor importancia en cuanto a la caracterización de la infraestructura actual y proyectada, la normatividad, la problemática, el marco institucional, los dispositivos para su control, autoridad competente, entre otros.

Así mismo se incluyen las últimas técnicas para la realización de los análisis de capacidad y niveles de servicio en cada uno de los elementos de la infraestructura vial, en especial lo relacionado con el cálculo de la capacidad en intersecciones semaforizadas, intersecciones reguladas con señales de pare, intersecciones tipo glorieta, vías multicarriles, accesos peatonales, ciclorrutas y arterias urbanas, con la base fundamental del HCM 2000 e investigaciones y experiencias nacionales e internacionales de los últimos años, entre las que se consideraron, como es natural, las propias del consultor y las desarrolladas durante el proceso de la elaboración del presente *Manual*.

Igualmente, se ha visto la necesidad de realizar la calibración de los parámetros de tránsito y de esta manera actualizar y validar los valores utilizados en el *Manual de planeación y diseño* del año 1998, teniendo en cuenta las nuevas condiciones que ofrece el desarrollo y el crecimiento de la ciudad en la actualidad; por esta razón, parámetros como flujos de saturación, velocidades a flujo libre,

brechas críticas, tiempos de seguimiento, tiempos perdidos en el arranque y despeje, factores de ajuste para vehículos pesados, maniobras de estacionamiento, obstrucción de buses, y pasos peatonales, brechas críticas, tiempo de seguimiento, niveles de servicio para facilidades peatonales, velocidades medias en cruces peatonales, volúmenes en glorietas, volúmenes, velocidades y densidades en ciclorrutas, que resultan afectados con cambios en el comportamiento de los usuarios del sistema de transporte urbano, condiciones socioeconómicas y cambios en la tecnología vehicular y en la infraestructura vial. Variables dinámicas que están sujetas a condiciones de espacio y tiempo que dependen también de las características socioeconómicas, del entorno y del medio ambiente, condiciones diferentes y cambiantes con respecto a las establecidas en 1998, fecha en la que se editó el último manual, y que por este motivo se deben actualizar y analizar tendencias.

Vale la pena anotar que los parámetros establecidos dentro del marco del presente manual se deberán utilizar para fases o etapas de proyectos circunscritos en un proceso de planeación, es decir, para prediseño de intersecciones, arterias, calles y demás elementos de infraestructura, proyectados, los cuales deben tener características similares a los medidos.

Por otra parte, los manuales para estudios de campo de mayor uso en la ingeniería de tránsito y transporte se actualizaron conforme a experiencias e investigaciones recientes en el medio y teniendo en cuenta la racionalización de los estudios donde es aplicable, así como también exigencias de la Secretaría de Tránsito y Transporte. Adicionalmente, se incluyeron instructivos adicionales para complementar las actividades relacionadas con la toma de datos de campo.

Si hay un elemento que ha ido avanzado vertiginosamente en la actualidad es la crea-

ción y adaptación de programas de cómputo usados como herramientas en la modelaciones del tránsito en situaciones actuales y futuras; por esta razón se incorporan en esta versión los tutoriales de algunos de los programas con mayor utilización.

Adicionalmente se incluyen lineamientos para la realización de estudios que estén relacionados con la operación del tránsito y el transporte en la ciudad, al igual que términos de referencia generales, útiles para la planeación, ejecución y supervisión de estudios y proyectos. Se incluye también la descripción de los elementos de infraestructura que la ciudad ha adoptado para la integración del sistema de transporte urbano, como las ciclorrutas y elementos de pacificación de tránsito.

ESTRUCTURA DEL MANUAL

El *Manual* está constituido por:

- Tomo I : Marco conceptual
- Tomo II : Planeación del transporte urbano
- Tomo III : Tránsito
- Tomo IV : Transporte público
- Tomo V : Seguridad vial y medidas de gestión

Los anexos los constituyen los ejemplos de Calibración de parámetros de tránsito y los formatos de campo recomendados por el *Manual*. El glosario de términos especializados utilizados dentro del texto se incorporó como elemento independiente en el tomo V.

A continuación se relacionan los temas que integran cada uno de los tomos que forman parte del *Manual*.

Tomo I. Marco conceptual

El marco conceptual está constituido por los siguientes temas:

- ♦ Presentación del *Manual*

- ♦ Capítulo 1: Planeación del transporte urbano
- ♦ Capítulo 2: Tránsito vehicular
- ♦ Capítulo 3: Transporte público
- ♦ Capítulo 4: Seguridad vial
- ♦ Capítulo 5: Tránsito y transporte en Bogotá
- ♦ Capítulo 6: Técnicas de muestreo

Tomo II: Planeación del transporte urbano

- ♦ Presentación del *Manual*
- ♦ Capítulo 1: Conceptos generales de planeación del transporte urbano
- ♦ Capítulo 2: Programas de la planeación del transporte urbano
- ♦ Capítulo 3: Grandes generadores de viajes
- ♦ Capítulo 4: Estudios de campo para oferta y demanda de transporte
- ♦ Capítulo 5: Términos de referencia generales.
- ♦ Capítulo 6: Parámetros de tránsito, caso Bogotá. Flujo no motorizado.
- ♦ Capítulo 7: Parámetros de tránsito, caso Bogotá. Flujo continuo.
- ♦ Capítulo 8: Parámetros de tránsito, caso Bogotá. Flujo discontinuo.

Tomo III: Tránsito

- ♦ Presentación del *Manual*
- ♦ Capítulo 1: Capacidad y niveles de servicio. Tránsito no motorizado
- ♦ Capítulo 2: Capacidad y niveles de servicio. Flujo continuo
- ♦ Capítulo 3: Capacidad y niveles de servicio. Flujo discontinuo
- ♦ Capítulo 4: Programas en ingeniería de tránsito
- ♦ Capítulo 5: Estudios de campo para el tránsito vehicular
- ♦ Capítulo 6: Estudios de campo para usuarios

Tomo IV: Transporte público

- ♦ Presentación del *Manual*
- ♦ Capítulo 1: Atributos en sistemas de transporte público
- ♦ Capítulo 2: Programas de transporte público
- ♦ Capítulo 3: Lineamientos para la ejecución de estudios de transporte público
- ♦ Capítulo 4: Estudios de campo para la demanda del transporte público
- ♦ Capítulo 5: Estudios de campo para la oferta del transporte público
- ♦ Capítulo 6: Calidad del servicio de transporte público

- ♦ Capítulo 7: Lineamientos para el cálculo de tarifas

Tomo V: Seguridad vial y medidas de gestión

- ♦ Presentación del *Manual*
- ♦ Capítulo 1: Lineamientos para la evaluación de la seguridad vial
- ♦ Capítulo 2: Identificación y estudio de sitios, corredores y sectores peligrosos
- ♦ Capítulo 3: Medidas de mejoramiento del sistema de transporte
- ♦ Capítulo 4: Tráfico calmado
- ♦ Glosario

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá, especialmente en la última década, ha venido afrontando problemas de congestión vehicular, comunes a las grandes capitales y ciudades del mundo que han consolidado sistemas de transporte orientado al transporte privado. Sin embargo, la administración del Distrito Capital ha sido pionera en tomar medidas de regulación y de moderación de la demanda vehicular, restricciones del uso del vehículo particular, colectivo e individual en ciertos horarios, así como en la implantación de una ambiciosa red de ciclorrutas y del sistema de transporte masivo en carriles troncales exclusivos, conocido como Transmilenio.

En el presente tomo se han caracterizado los lineamientos necesarios para realizar diversos estudios de tránsito, cumpliendo con los parámetros de recolección y muestreo de datos, la medición y confiabilidad estadística, temas básicos de capacidad y niveles de servicio, y actualizando las metodologías del *Manual de capacidad de carreteras HCM- 1994* para adaptarlas a la última versión del año 2000.

La Ingeniería de tránsito busca optimizar el uso de la infraestructura para el tipo apropiado de vehículos y la seguridad, economía y eficiencia. Los estudios de tránsito tratan de identificar y prever el comportamiento del flujo vehicular en redes viales, explicado a través de modelos matemáticos que incluyen las tres

variables de la ecuación fundamental del tránsito: velocidad, densidad u ocupación vial y capacidad.

Este tomo presenta los conceptos básicos de la Ingeniería de Tránsito: corrientes vehiculares, parámetros de tránsito macroscópico, parámetros de tránsito microscópico, teoría de flujo vehicular, relaciones entre corrientes vehiculares y teoría del congestionamiento y, en general, las relaciones con otros sistemas.

La matemática, y en particular la probabilidad y la estadística, proporcionan unas herramientas muy valiosas para la modelación o simulación de las condiciones del tránsito en una red. Su utilización permite contemplar de manera fácil y rápida diferentes escenarios que ayudan en la toma de decisiones sin interferir en la circulación normal de vehículos, permitiendo prever variaciones en sus comportamientos en cuanto a tiempos de demora, longitudes de cola, tiempos de espera, flujos de saturación y demás parámetros requeridos en el estudio.

La clasificación del *Manual Americano* en cuanto al tipo de vías es clara para las condiciones de Estados Unidos. Sin embargo, la caracterización de las vías de Bogotá debe adaptarse a las condiciones propias de composición vehicular, comportamiento de usuarios y otros factores planteados en el capítulo

dedicado a la determinación de los parámetros de capacidad y nivel de servicio.

La modelación puede llevarse a cabo en modelos estáticos o dinámicos; los primeros arrojan datos puntuales sobre condiciones dadas, mientras que los segundos permiten analizar de forma visual las condiciones de movimiento mediante la animación gráfica y tienen el atractivo de retardar o acelerar el paso de los cuadros. También permiten verificar detalles imperceptibles a simple vista cuando las situaciones se dan en tiempo real o tamaño natural.

Los trabajos de campo resultan fundamentales para el planteamiento de un modelo adecuado. Es corriente escuchar que si en un modelo ingresan inconsistencias, sus resultados serán inconsistentes. La responsabilidad de los profesionales involucrados en la toma de información de campo es muy alta pues al final repercute en medidas que pueden llegar a comprometer seriamente la seguridad de las personas.

Tradicionalmente se ha considerado que el “usuario” es el conductor de vehículo mo-

torizado (automóvil), pero el sentido ampliado que le da el presente manual abarca a los ciclistas, peatones y demás actores del tránsito. El capítulo final se ocupa de los estudios que deben realizarse en el campo para los aspectos relacionados con los usuarios mencionados.

Como el tránsito es un subsistema de la infraestructura de los sistemas de transporte de una ciudad, debe articularse y lograr la mejor coordinación para el transporte público, particular, masivo, colectivo y el transporte alternativo, pues existe una estrecha correlación entre los conceptos de tránsito o tráfico y el de Transporte como aceptó recientemente la Real Academia Española.

El tema de la regulación y control semafórico tiene particular importancia dentro del flujo vehicular. Al mismo tiempo que brinda seguridad a usuarios, busca optimizar el uso de la red, asignando tiempos a flujos encontrados o conflictivos dentro de ciertas restricciones mínimas establecidas que se muestran en detalle en el manual.

RESUMEN

TOMO III. TRÁNSITO

El enfoque general del Tomo III, *Tránsito*, es presentar los principales fundamentos conceptuales que se tienen en cuenta en el desarrollo de los estudios de tránsito: metodologías para la determinación de la capacidad vial y niveles de servicio, programas de Ingeniería de Tránsito, estudios de campo para el tránsito vehicular y estudios de campo para usuarios. A continuación se describen los diferentes temas que se tratan en el presente documento.

Capacidad y niveles de servicio. Flujo no motorizado

En este capítulo se tratarán los temas relacionados con peatones y ciclistas. En lo referente a peatones, se adaptó la metodología expuesta en el *Manual de capacidad para carreteras (HCM-2000)* para diferentes tipos de infraestructuras peatonales como anillos, senderos, zonas de espera, intersecciones semaforizadas y de prioridad, entre otros.

Para el análisis de capacidad y niveles de servicio de instalaciones para ciclistas se concentró solamente en las ciclorrutas. En este caso, y debido a que no se consideró oportuno utilizar la metodología descrita en el HCM – 2000, se estudiaron las bases para

empezar a generar un método más ajustado a las condiciones de circulación e infraestructura prevalecientes en la red de ciclorrutas de la ciudad. Una de estas metodologías experimentales se basa en la teoría de flujo vehicular, en la que se requiere medir volúmenes, velocidades y densidades sobre un mismo tramo en intervalos de tiempo predeterminados, de manera que posteriormente se puedan obtener correlaciones entre estas variables. Se desarrolló una metodología basada en la percepción del usuario con base en unas encuestas cuyo objetivo es establecer la percepción de los ciclousuarios, con respecto al ancho disponible para tránsito, obstáculos, adelantamientos y detenciones que se pudieron presentar en su recorrido.

Esta primera aproximación al tema en el medio bogotano plantea un punto de partida para desarrollos posteriores que tomen la metodología que se propone y se dé un desarrollo más amplio desde el punto de vista práctico y académico.

Capacidad y niveles de servicio. Flujo continuo

En este capítulo y en el siguiente se recoge la vasta experiencia obtenida por el “Transportation Research Board”, descrita en el *Manual de capacidad para carreteras*

(HCM– 2000) en el análisis de capacidad y nivel de servicio, así como la experiencia reconocida del país en infraestructuras viales con características de flujo continuo, como vías multicarriles, secciones básicas de autopistas, rampas de convergencia y divergencia, tramos de entrecruzamientos y la experiencia colombiana respecto a carreteras de dos carriles.

Capacidad y niveles de servicio. Flujo discontinuo

Continuando el tema del anterior capítulo se presenta la experiencia estadounidense en estructuras viales con características de flujo discontinuo, como las intersecciones controladas con semáforo, las intersecciones de prioridad controlada con señal de PARE y las arterias urbanas. Para las glorietas se ha incorporado además de la experiencia norteamericana, expuesta en el HCM 2000, la inglesa, de acuerdo con las indicaciones del “Transport Research Laboratory”, TRL y la metodología francesa CETUR–86, adaptada a partir de ésta última.

Programas en Ingeniería de Tránsito

En este capítulo se encuentran los tutoriales generales de los programas de mayor utilización en nuestro medio, como HCS, SIDRA, TRANSYT 7F, CORSIM SYNCHRO.

Estudios de campo para el tránsito vehicular

En el capítulo de estudios de campo para el tránsito vehicular, se incluyeron en primera instancia unas recomendaciones generales para su ejecución. En seguida, se describen los instructivos de los estudios de campo más utilizados en nuestro medio: volúmenes de tránsito direccionales en intersecciones, en tramos viales y en estaciones maestras, ocupación vehicular, velocidades, tiempos de recorrido y de detención en intersecciones controladas por semáforo.

Estudios de campo para usuarios

El texto incluye la descripción del estudio del comportamiento de los conductores ante los dispositivos del control del tránsito y estudios de peatones.

1

Capacidad y Nivel de Servicio del Tránsito no Motorizado

CONTENIDO

1.1	PEATONES	1-7
1.1.1	Principios del flujo peatonal	1-8
1.1.1.1	Relaciones velocidad-densidad	1-8
1.1.1.2	Relaciones flujo-densidad	1-9
1.1.1.3	Relaciones velocidad-flujo	1-9
1.1.1.4	Relaciones velocidad-espacio	1-10
1.1.2	Medidas de funcionamiento	1-10
1.1.3	Pelotones	1-12
1.1.3.1	Peatones en un pelotón	1-15
1.1.4	Aplicaciones	1-15
1.1.5	Limitaciones de la metodología	1-16
1.1.6	Requerimientos de espacio	1-16
1.1.7	Datos de entrada y valores estimados	1-17
1.1.7.1	Velocidad de caminata	1-17
1.1.7.2	Tiempo de arranque y reacción	1-17
1.1.7.3	Ancho efectivo	1-18
1.1.7.4	Radio en esquinas	1-19
1.1.7.5	Período de análisis	1-20
1.1.8	Flujo continuo en instalaciones peatonales	1-22
1.1.8.1	Andenes y senderos peatonales	1-22
1.1.8.2	Zonas de espera	1-24
1.1.8.3	Zonas peatonales compartidas	1-24
1.1.9	Flujo discontinuo en instalaciones peatonales	1-26
1.1.9.1	Intersecciones semaforizadas	1-26
1.1.9.2	Intersecciones de prioridad	1-32
1.1.9.3	Senderos peatonales en vías urbanas	1-33
1.2	CICLORRUTAS	1-34
1.2.1	Concepto de nivel de servicio	1-35
1.2.2	Niveles de servicio	1-36
1.2.3	Calidad del servicio	1-37
1.2.4	Funcionamiento	1-39
1.2.4.1	Sobrepasos y circulación en pares	1-39
1.2.4.2	Trayectoria de sobrepaso	1-40
1.2.4.3	Estimación de la capacidad con base en intervalos	1-42
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1-44

FIGURAS

Figura 1.1	Relación entre velocidad y densidad	1-9
Figura 1.2	Relación entre flujo peatonal y espacio	1-10
Figura 1.3	Relación entre flujo peatonal y velocidad	1-10
Figura 1.4	Relación entre velocidad y espacio	1-11
Figura 1.5	Tráfico en cruces, probabilidad de conflictos	1-11
Figura 1.6	Nivel de servicio para andenes	1-13
Figura 1.7	Nivel de servicio para zonas de espera	1-14
Figura 1.8	Variaciones minuto a minuto en flujos peatonales	1-15
Figura 1.9	Elipse para requerimientos de espacio	1-16
Figura 1.10	Distribución típica de velocidades a flujo libre	1-18
Figura 1.11	Ajustes de ancho debido a obstáculos	1-20
Figura 1.12	Geometría de la intersección y movimientos peatonales	1-28
Figura 1.13	Condición 1: cruce sobre la calle secundaria	1-29
Figura 1.14	Condición 2: cruce sobre la calle principal	1-30
Figura 1.15	Niveles de servicio	1-39
Figura 1.16	Trayectoria de maniobras de sobrepasos	1-41
Figura 1.17	Distribución de la diferencia en la posición lateral de pares	1-42
Figura 1.18	Definición del intervalo para estimar la capacidad	1-43

TABLAS

Tabla 1.1	Datos de entrada y valores por defecto para peatones	1-17
Tabla 1.2	Velocidades de caminata - instalaciones peatonales	1-18
Tabla 1.3	Tiempos estándar de arrancada	1-19
Tabla 1.4	Anchos típicos de obstáculos en instalaciones peatonales	1-19
Tabla 1.5	Radios estándar en esquinas	1-20
Tabla 1.6	Radios en esquina para sectores desarrollados (M)	1-21
Tabla 1.7	Radios en esquina para sectores no desarrollados (M)	1-21
Tabla 1.8	Criterios de nivel de servicio para andenes y senderos peatonales HCM	1-23
Tabla 1.9	Criterios de nivel de servicio para andenes y senderos peatonales estimados para Bogotá	1-23
Tabla 1.10	Ajuste del criterio de nivel de servicio para pelotones	1-23
Tabla 1.11	Criterio de nivel de servicio para escaleras HCM	1-24
Tabla 1.12	Criterio de nivel de servicio para escaleras, estimados para Bogotá	1-24
Tabla 1.13	Criterios de nivel de servicio para flujos peatonales cruzados	1-24
Tabla 1.14	Criterios de nivel de servicio para zonas de espera	1-25
Tabla 1.15	Criterios de nivel de servicio para vías peatonales compartidas*	1-26
Tabla 1.16	Criterios de nivel de servicio para peatones en intersecciones semaforizadas, HCM	1-26
Tabla 1.17	Criterios de nivel de servicio para peatones en intersecciones semaforizadas	1-27

Tabla 1.18	Criterios de nivel de servicio para peatones en intersecciones de prioridad	1-34
Tabla 1.19	Criterios de nivel de servicio para zonas peatonales en vías urbanas	1-34
Tabla 1.20	Niveles de servicio de acuerdo con el criterio de interferencia	1-37
Tabla 1.22	Volúmenes y frecuencia de eventos - información local	1-38
Tabla 1.21	Volúmenes y frecuencia de eventos	1-38
Tabla 1.23	Características de las maniobras de sobrepaso	1-40
Tabla 1.24	Percentil 50 de posición lateral para bicicletas	1-42
Tabla 1.25	Efecto de la altura del bordillo en la posición lateral	1-42
Tabla 1.26	Resultados de la estimación de capacidad	1-43

El flujo no motorizado en este caso se refiere a peatones y ciclistas. En este capítulo se dan los lineamientos para calcular la capacidad y estimar el nivel de servicio en diferentes instalaciones peatonales, como andenes, escaleras, rampas, puentes peatonales. Para los ciclistas, se presenta un esfuerzo interesante con el fin de desarrollar una metodología propia para el caso local. En este caso se dejaron las bases para el desarrollo de dos metodologías fundadas en dos puntos de vista diferentes: la primera se basa en las teorías de flujo vehicular; la segunda, en la percepción del usuario de la ciclorruta.

En cuanto a análisis peatonales, se adaptaron las metodologías expuestas en el *Manual de capacidad para carreteras (HCM-2000)* al entorno local peatonal existente y proyectado en la ciudad, lo cual será gran utilidad para evaluar desde el punto de vista de capacidad el sistema.

1.1 PEATONES

En este numeral se trata el tema relacionado con la capacidad y la estimación de los niveles de servicio para instalaciones peatonales. La metodología descrita se aplica en los siguientes tipos de infraestructura:

- ◆ Senderos y zonas peatonales. Terminales, andenes, escaleras, rampas y rutas

diseñadas exclusivamente para peatones.

- ◆ Zonas de espera. Áreas donde los peatones se detienen temporalmente esperando ser atendidos. Estos lugares pueden ser ascensores, plataformas de espera y cruces peatonales.
- ◆ Zonas peatonales fuera de vía. Están separadas físicamente de las calzadas vehiculares para el uso de peatones, ciclistas, patinadores y, en general, para el tráfico no motorizado.
- ◆ Zonas de cruce. Cruces peatonales en intersecciones semaforizadas y de prioridad.
- ◆ Zonas peatonales a lo largo de vías urbanas. Se refieren a tramos de senderos y caminos afectados por intersecciones; presentan flujo discontinuo e interrupciones fijas.

Los siguientes términos son importantes para el análisis de la capacidad y nivel de servicio en instalaciones peatonales:

- ◆ La velocidad peatonal (de caminata) es el promedio de velocidad de caminata, el cual generalmente se expresa en metros por minuto [m/min] o por segundo [m/s].
- ◆ La tasa de flujo peatonal es el número de peatones que pasan por un punto fijo en un período determinado, expresado en peatones por 15 minutos o en peatones

por minuto [peat/min]. Al referirse a un punto, se quiere decir una línea de referencia (puede ser visual) perpendicular a la zona peatonal.

- ♦ El flujo peatonal por unidad de longitud (ancho de la instalación) es el flujo peatonal promedio por unidad de ancho efectiva de la instalación (generalmente andenes o cruces), expresado en peatones por minuto por metro [peat/ min/m].
- ♦ La densidad peatonal es el número promedio de peatones por unidad de área dentro de una zona peatonal dada, expresado en peatones por metro cuadrado [peat/m²].
- ♦ El espacio peatonal es el promedio de área que cada peatón ocupa en una zona peatonal, expresado en metros cuadrados por peatón [m²/peat]. Este valor es el inverso de la densidad; a menudo es más práctico para utilizarlo en el análisis de capacidad.
- ♦ Los pelotones se refieren al número de peatones que caminan juntos en un grupo, generalmente de manera voluntaria, como resultado de un cruce semaforizado u otros factores.

1.1.1 Principios del flujo peatonal

Las medidas cualitativas utilizadas para medir el flujo peatonal son similares a las utilizadas para el tráfico vehicular; por ejemplo, elegir la velocidad de circulación y la libertad de hacer sobrepasos. Otras medidas se refieren específicamente al flujo peatonal, como la habilidad de cruzar corrientes peatonales, caminar en sentido contrario al mayor flujo presente, libertad de maniobrar libremente y sin que se presenten conflictos y cambios en la velocidad de caminata. También se presentan las demoras ocasionadas en intersecciones semaforizadas y no semaforizadas.

Existen otros factores relacionados con el entorno, los cuales afectan la experiencia de caminar y la percepción del nivel de servicio, como el confort, la comodidad, la seguridad (tanto en seguridad ciudadana como vial) y la economía. Entre los factores de confort se encuentran la protección del tiempo, el clima, refugios del tránsito, paraderos, entre otros. Los factores de comodidad incluyen las distancias de caminata, el trazado, pendientes, rampas en andenes, señalización y, en general, los factores que hacen del caminar una actividad fácil y descomplicada.

La seguridad en la instalación está dada por la separación de las zonas peatonales del tráfico vehicular. En el plano horizontal se encuentran las alamedas y otras zonas libres de vehículos; en el plano vertical, se encuentran pasos elevados y, en algunas ocasiones, deprimidos. Los dispositivos de control de tráfico dan tiempos de separación entre el tráfico peatonal y vehicular. Las características de seguridad y control en la vía incluyen iluminación, zonas de visibilidad abierta y en general el uso que tenga el sector.

Estos factores alternos pueden afectar la percepción general de los peatones acerca de la calidad del entorno de la vía. Aunque el usuario del automóvil tiene un control razonable sobre la mayoría de estos factores, el peatón casi no tiene ninguno. Este capítulo hace énfasis en el análisis del nivel de servicio de las medidas presentes en los flujos peatonales como la velocidad, el espacio y la demora. Los factores presentes en el entorno también pueden considerarse como influyentes en la actividad peatonal.

1.1.1.1 Relaciones velocidad-densidad

La relación fundamental entre velocidad, densidad y volumen para flujos peatonales es

análoga al de flujos vehiculares. A medida que el volumen y la densidad aumentan, la velocidad peatonal disminuye. Cuando aumenta la densidad y el espacio peatonal disminuye, el grado de movilidad del peatón disminuye, al igual que la velocidad media en el flujo peatonal.

La Figura 1.1 muestra la relación entre la velocidad y la densidad entre tres tipos diferentes de clases de peatones.

1.1.1.2 Relaciones flujo-densidad

La relación entre densidad, velocidad y flujo de peatones es similar a la del tráfico vehicular, y se expresa según la siguiente ecuación:

$$v_{peat} = S_{peat} * D_{peat} \quad 1.1$$

donde

v_{peat} = flujo peatonal unitario [peat/min/m]

S_{peat} = velocidad peatonal [m/min]

D_{peat} = densidad peatonal [peat/m²]

El flujo variable en esta expresión es el flujo unitario, definido anteriormente.

Como alternativa, existe una ecuación más útil, análoga a la de densidad, o espacio:

$$v_{peat} = \frac{S_{peat}}{M} \quad 1.2$$

donde

M = espacio peatonal [m²/peat]

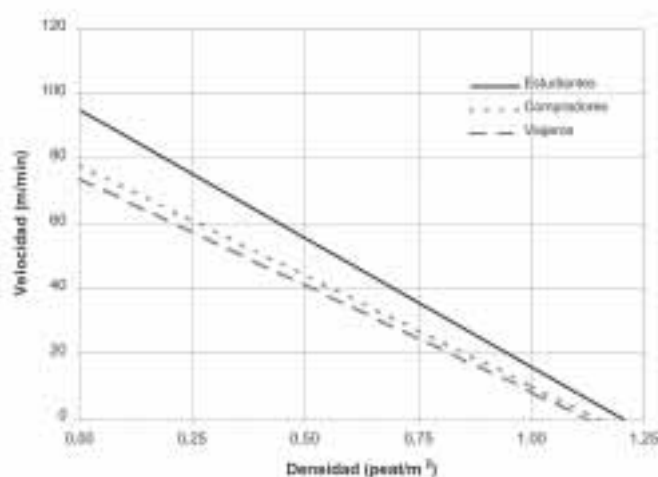
La relación básica entre flujo y espacio es tratada en diferentes investigaciones y se muestra en la Figura 1.2.

Las condiciones donde se presenta el flujo máximo representan la capacidad de la instalación peatonal. En la figura anterior, según el HCM, es evidente que todas las observaciones presentan sus flujos máximos en un pequeño rango de densidad que varía entre 0.4 y 0.9 m²/peat. Cuando el espacio se reduce a menos de 0.4 m²/peat, el flujo peatonal unitario decrece rápidamente. Todos los movimientos se detienen cuando se llega a la mínima asignación de espacio entre 0.2 y 0.3 m²/peat. Estas relaciones muestran que el tráfico peatonal puede ser evaluado cualitativamente usando conceptos similares de nivel de servicio a los del tráfico automotor. Para flujos con valores cercanos a la capacidad, se requiere un promedio de 0.4 y 0.9 m²/peat para que cada peatón pueda moverse. Sin embargo, en este nivel de flujo el área disponible restringe la velocidad y la libertad de maniobra.

1.1.1.3 Relaciones velocidad-flujo

La Figura 1.3 muestra la relación entre el flujo y la velocidad peatonal. Estas curvas muestran que cuando hay pocos peatones en determinada zona peatonal, hay espacio disponible para ele-

Figura 1.1
Relación entre
velocidad y
densidad



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

gir velocidades más altas que las normales. A medida que el flujo aumenta, la velocidad disminuye debido a las interacciones entre peatones. Cuando se llega al nivel crítico donde hay una gran cantidad de peatones, el movimiento se empieza a dificultar y ambos, tanto la velocidad como el flujo, disminuyen.

1.1.1.4 Relaciones velocidad-espacio

La Figura 1.4 confirma la relación entre la velocidad de caminata y el espacio disponible y sugiere algunos puntos para definir los rangos donde desarrollar el criterio de nivel de servicio. Los valores de la Figura 1.4 indican que en un espacio promedio de menos de $1.5 \text{ m}^2/\text{peat}$, incluso los peatones más lentos no pueden alcanzar su velocidad deseada.

Los peatones más rápidos, quienes alcanzan velocidades mayores de 1.8 m/s , no pueden alcanzar este valor a menos que el espacio disponible sea $4.0 \text{ m}^2/\text{peat}$ o mayor.

1.1.2 Medidas de funcionamiento

El criterio para estimar el nivel de servicio en instalaciones peatonales está basado en medidas subjetivas, que pueden ser imprecisas. Sin embargo, es posible definir rangos de valores para espacio por peatón, tasas de flujo y velocidades, los cuales pueden utilizarse para desarrollar el criterio de calidad de flujo.

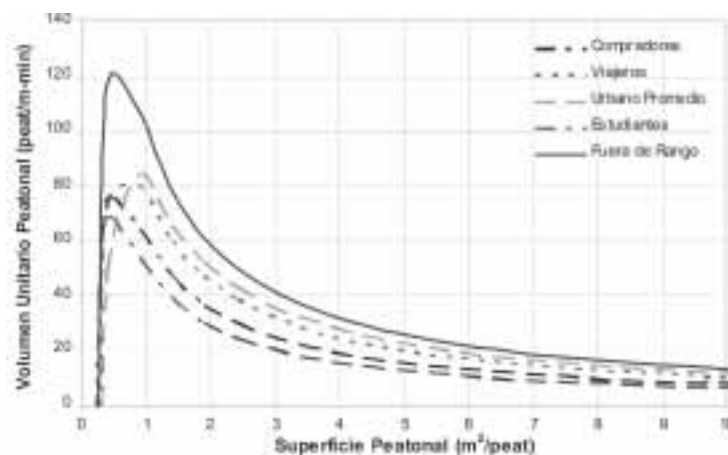


Figura 1.2
Relación entre
flujo peatonal
y espacio

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

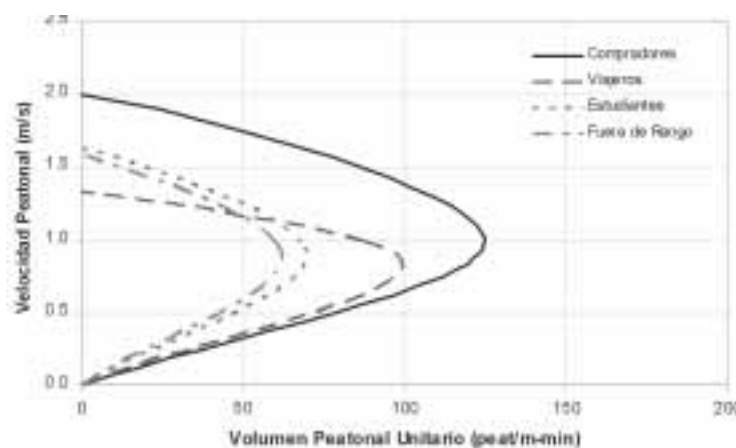
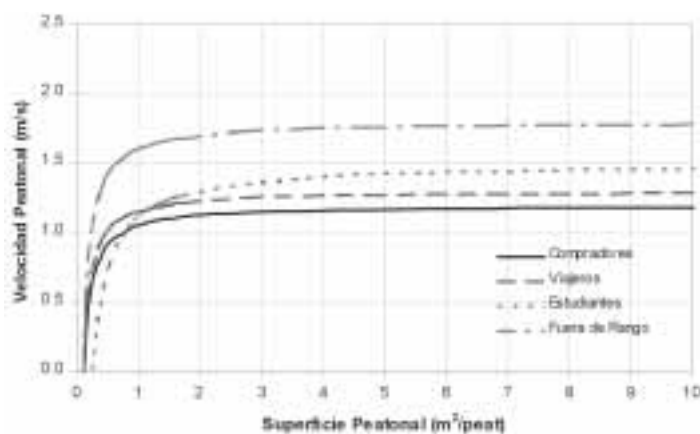


Figura 1.3
Relación entre
flujo peatonal y
velocidad

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

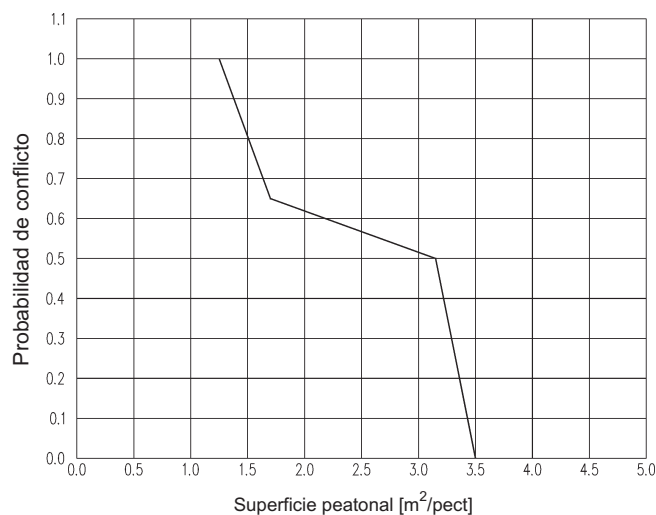
La velocidad es un importante criterio de nivel de servicio debido a que puede ser observada y medida fácilmente, y porque es una medida descriptiva de la percepción del servicio por parte de los peatones. Según el HCM, a velocidades de 42 m/min (0.7 m/s) o menos, la mayoría de los peatones recurren a rutas alternas no recomendadas. La Figura 1.4 muestra que esta velocidad corresponde a un espacio por peatón entre 0.6 y $0.7 \text{ m}^2/\text{peat}$. Para espacios iguales o menores de $1.5 \text{ m}^2/\text{peat}$, incluso los peatones más lentos son obligados a bajar la velocidad. Los peatones más rápidos no pueden alcanzar una velocidad de 108 m/min (1.8 m/s) hasta que el espacio disponible sea mayor de $4.0 \text{ m}^2/\text{peat}$.

Figura 1.4
Relación entre
velocidad y
espacio



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

Figura 1.5
Tráfico en
cruces,
probabilidad
de conflictos



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

Como se puede ver en la Figura 1.2, estos tres valores de espacio, 0.6, 1.5 y 4.0 m²/peat corresponden aproximadamente al máximo flujo operando a capacidad, a las dos terceras partes de la capacidad y a una tercera parte de la capacidad, respectivamente.

Existen otros indicadores importantes del nivel de servicio. Por ejemplo, la habilidad de una persona para cruzar una corriente peatonal disminuye en espacios menores de 3.5 m²/peat, como se muestra en la Figura 1.5. En este nivel, la probabilidad de parar o romper el paso de caminata se reduce a cero. Debajo de 1.5 m²/peat, casi en cada movi-

miento de cruce se presenta un conflicto. De forma similar, la habilidad de cruce de los peatones más lentos se conserva en los 3.5 m²/peat, pero se pierde progresivamente a medida que este espacio llega a 1.8 m²/peat, punto donde el paso se vuelve casi imposible.

Otro indicador de nivel de servicio es mantener el flujo peatonal en la dirección de menor importancia cuando hay un mayor flujo opuesto de peatones. En flujos peatonales con volúmenes importantes y similares en ambas direcciones, se presenta una pequeña reducción en la capacidad de la zona peatonal en comparación con una de un solo sentido, debido a que los flujos direccionales tienden a separarse y a ocupar (compartir) una porción similar de espacio dentro de la vía (andén). Sin embargo, si la distribución de los flujos direccionales es cercana al 90-10 y el espacio es 1.0 m²/peat, la reducción en la capacidad está cerca del 15%, según observaciones previas. Esta reducción resulta de la incapacidad del flujo menor de utilizar una porción de la vía.

Estudios fotográficos muestran que los movimientos peatonales en andenes son afectados por otros peatones, incluso cuando el espacio disponible es mayor de 4.0 m²/peat. Cuando el espacio es 6.0 m²/peat se ha observado que los peatones caminan siguiendo un patrón de tablero de ajedrez, en vez de caminar uno detrás de otro o al lado de otro. Estas mismas observaciones sugieren que

hasta 10.0 m²/peat son necesarios antes que ocurra un movimiento completamente libre sin conflicto y que en 13 m²/peat ya no hay influencia alguna de peatón a peatón. Los pelotones no desaparecen totalmente hasta que el espacio disponible llega a 50 m²/peat o más. En la Figura 1.6 se ilustra y describe el nivel de servicio para andenes. Este criterio de nivel de servicio está basado en flujos promedios y no tiene en cuenta flujos de pelotones.

El concepto de utilizar el espacio promedio disponible de peatones en andenes para estimar el nivel de servicio también puede aplicarse a colas o zonas de espera. En estas zonas el peatón se detiene temporalmente esperando ser atendido. El nivel de servicio para zonas de espera está relacionado con el espacio promedio disponible para cada peatón y el grado de movilidad disponible.

En casos en que se presenten aglomeraciones densas, hay poco espacio para moverse, pero es posible la circulación porque se incrementa el espacio promedio por peatón.

Las descripciones de nivel de servicio para zonas donde se formen colas (con peatones detenidos) están basadas en el promedio de espacio por peatón, la comodidad personal y la movilidad interna, como se muestra en la Figura 1.7. Las áreas donde se presenta un NS E con 0.2 a 0.3 m²/peat se encuentran solamente en ascensores y en vehículos. El NS D entre 0.3 y 0.6 m²/peat describe también aglomeraciones densas, pero con cierto nivel de maniobra. Esto comúnmente ocurre en andenes cuando grupos de peatones esperan cruzar una calle en una esquina. Las zonas de espera requieren más espacio para la circulación, como vestíbulos y plataformas de tránsito, y deben tener un nivel de servicio más alto.

1.1.3 Pelotones

El promedio de las tasas de flujo en diferentes niveles de servicio tiene una utilidad limitada, a menos que se especifiquen los intervalos de tiempo. La Figura 1.8 muestra tasas de flujo promedio que pueden llegar a ser engañosas. La información mostrada se tomó en dos sectores de la ciudad de Bogotá. El máximo flujo presente en períodos de 5 minutos promedió entre 50 y 120 peat/min/m del ancho efectivo de la zona peatonal durante el período aforado.

Según los patrones de tráfico, una instalación peatonal diseñada para un flujo promedio puede permitir una calidad más baja en el servicio para una porción de sus usuarios. Sin embargo, no es prudente diseñar para flujos máximos presentes en los intervalos de un minuto debido a que estos sólo se presentan en 1 o 2% del tiempo. Se debe determinar un período relevante con una evaluación precisa de las fluctuaciones del tráfico peatonal a corto plazo.

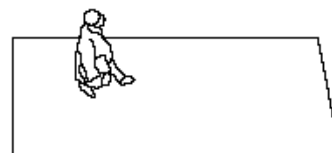
Estas fluctuaciones están presentes en la mayoría de los flujos no regulados de peatones, debido al arribo aleatorio de las personas. En los andenes, estas fluctuaciones aleatorias son exageradas por la interrupción del flujo y por la formación de colas, debido a los dispositivos de control de tránsito. Las instalaciones peatonales pueden originar oleadas de demanda liberando grandes grupos de peatones en cortos intervalos de tiempo, seguidas de intervalos en los cuales no se presentan flujos. Hasta que se dispersan, los peatones en estos tipos de grupos se mueven conjuntamente como pelotones. Los pelotones también pueden formarse si el paso es impedido por la insuficiencia de espacio o porque los peatones más rápidos deben bajar la velocidad, debido a los peatones más lentos.

Figura 1.6
Nivel de
servicio para
andenes

Nivel de servicio A

Espacio peatonal $> 5.6 \text{ m}^2/\text{peat}$ *Flujo* $\leq 16 \text{ peat}/\text{min}/\text{m}$

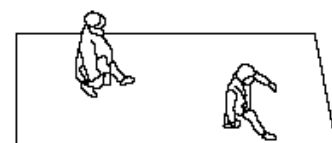
En un andén con nivel de servicio A, los usuarios se mueven en zonas ideales sin interferencias de otros peatones. Las velocidades de marcha son elegidas libremente y los conflictos entre peatones son improbables.



Nivel de servicio B

Espacio peatonal $> 3.7\text{-}5.6 \text{ m}^2/\text{peat}$ *Flujo* $> 16\text{-}23 \text{ peat}/\text{min}/\text{m}$

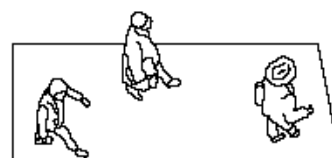
En el nivel de servicio B, hay suficiente área para que el peatón camine libremente a la velocidad que desee. A este nivel, los peatones comienzan a enterarse de la presencia de otros y a seleccionar una trayectoria adecuada.



Nivel de servicio C

Espacio peatonal $> 2.2\text{-}3.7 \text{ m}^2/\text{peat}$ *Flujo* $> 23\text{-}33 \text{ peat}/\text{min}/\text{m}$

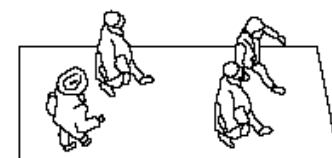
En el nivel de servicio C, el espacio es suficiente para velocidades de marcha normales y para sobrepasos sobre otros peatones en la dirección principal. El movimiento en dirección contrario o la realización de cruces pueden causar pequeños conflictos, lo cual hará que las velocidades y flujos sean un poco menores.



Nivel de servicio D

Espacio peatonal $> 1.4\text{-}2.2 \text{ m}^2/\text{peat}$ *Flujo* $> 33\text{-}49 \text{ peat}/\text{min}/\text{m}$

En este nivel de servicio, la libertad de elegir la velocidad de marcha individual o realizar sobrepasos, están restringidos. Los movimientos en la dirección secundaria o en cruce, presentan una alta probabilidad de conflictos y requieren frecuentes cambios de posición y velocidad. Este nivel de servicio indica una circulación razonablemente fluida, pero la fricción e interacción entre los peatones es muy probable.



Nivel de servicio E

Espacio peatonal $> 0.75\text{-}1.4 \text{ m}^2/\text{peat}$ *Flujo* $> 49\text{-}75 \text{ peat}/\text{min}/\text{m}$

En el nivel de servicio E, los peatones restringen su velocidad de marcha ajustando con frecuencia su paso. En su nivel más bajo, el movimiento hacia adelante es posible solamente arrastrando los pies. El espacio no es suficiente para hacer sobrepasos sobre los peatones más lentos. Los movimientos en la dirección secundaria o la realización de cruces son posibles, pero con dificultad extrema. Los volúmenes de diseño se acercan al límite de la capacidad peatonal, con cuellos de botella e interrupciones del flujo.



Nivel de servicio F

Espacio peatonal $\leq 0.17 \text{ m}^2/\text{peat}$

En el nivel de servicio F, todas las velocidades de marcha están totalmente restringidas y el movimiento hacia adelante se realiza solamente arrastrando los pies. Hay un contacto frecuente e inevitable con otros peatones. Los movimientos en la dirección secundaria o la realización de cruces son virtualmente imposibles de realizar. El flujo es esporádico e inestable. El espacio es más característico de zonas de espera que de zonas de paso peatonales.



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000).

Nivel de servicio A**Espacio peatonal promedio $> 1.2 \text{ m}^2/\text{peat}$**

Estar de pie y circular libremente a través de la zona de espera sin causar conflictos con otras personas que estén detenidas.

Nivel de servicio B**Espacio peatonal promedio $> 0.9-1.2 \text{ m}^2/\text{peat}$**

Estar de pie y circular parcialmente con restricciones a través de la zona de espera sin causar conflictos con otras personas que estén detenidas.

Nivel de servicio C**Espacio peatonal promedio $> 0.6-0.9 \text{ m}^2/\text{peat}$**

Estar de pie y circular con restricciones a través de la zona de espera causando conflictos con otras personas que estén detenidas. Esta densidad se encuentra dentro del rango de confort.

Nivel de servicio D**Espacio peatonal $> 0.3-0.6 \text{ m}^2/\text{peat}$**

Estar de pie sin roce con otras personas, la circulación altamente restringida en la zona de espera y sólo es posible realizar en grupo el movimiento hacia adelante. Esperar un largo tiempo con esta densidad es bastante incómodo.

Nivel de servicio E**Espacio peatonal $> 0.2-0.3 \text{ m}^2/\text{peat}$**

Estar de pie en contacto físico con otras personas es inevitable. La circulación en la zona de espera no es posible. La espera sólo puede durar un corto período sin causar un serio malestar a las personas.

Nivel de Servicio F**Espacio Pederal $> 0.2 \text{ m}^2/\text{peat}$**

Virtualmente todas las personas se encuentran en contacto unas con otras. Esta densidad es extremadamente incómoda. No hay posibilidad de realizar movimiento alguno y existe un peligro potencial de pánico en estas muchedumbres tan grandes.

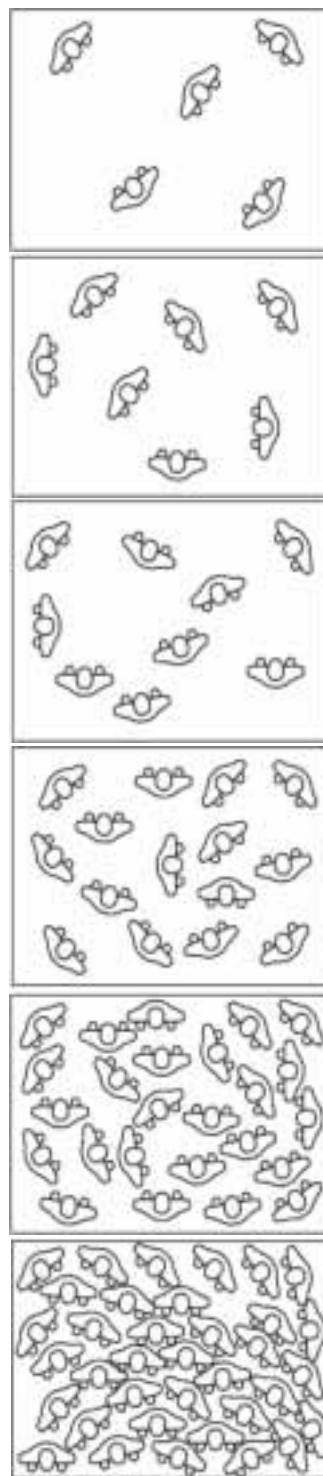
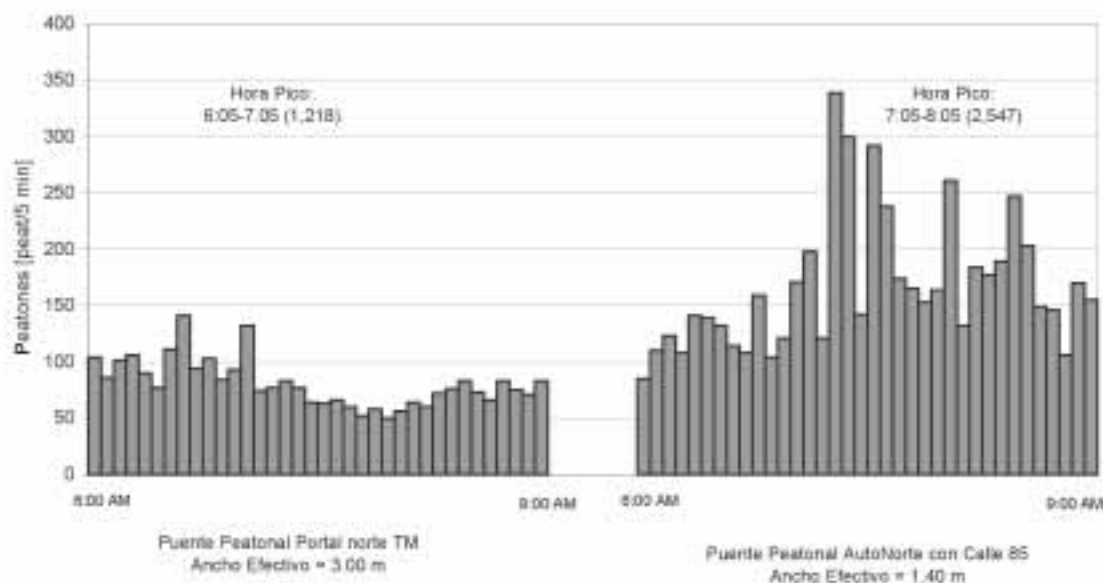


Figura 1.7
Nivel de
servicio para
zonas de
espera

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

Figura 1.8
Variaciones
minuto a
minuto en
flujos
peatonales

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000) y
elaboración
propia



Aunque la magnitud y la frecuencia de los pelotones debe ser verificada con estudios de campo, el nivel de servicio en pelotones es generalmente un nivel más bajo que el criterio de flujo promedio, excepto algunos casos de NS A y E, los cuales abarcan un amplio rango de flujos peatonales. Seleccionar un diseño para acomodar flujos promedios en un largo período u oleadas de demanda presentes en pelotones requiere una evaluación de comodidad, espacio disponible, costos y otras consideraciones.

1.1.3.1 Peatones en un pelotón

En cruces en intersecciones semaforizadas, una señal ubicada aguas arriba puede aumentar o disminuir la demora peatonal en la señal ubicada aguas abajo. De esta manera, el número de pelotones en una intersección semaforizada depende de la sincronización de los semáforos y del tiempo de verde de la señal de aguas arriba.

El número de peatones que cruzan por una intersección no semaforizada es deter-

minado por el flujo peatonal y vehicular. La siguiente ecuación puede utilizarse para determinar el número de peatones en un pelotón:

$$N_c = \frac{v_p * e^{v_p t_c} + v * e^{-v t_c}}{(v_p + v) e^{(v_p - v) t_c}} \quad 1.3$$

donde

N_c = tamaño del pelotón típico en cruces [peat]

v_{peat} = volumen peatonal [peat/s]

v = volumen vehicular [vh/s]

t_c = brecha crítica para un peatón [s]

1.1.4 Aplicaciones

En el análisis para el tipo de infraestructura antes indicada se debe tener en cuenta dos puntos fundamentales. Primero, se deben identificar con claridad las salidas principales. Esto incluye el nivel de servicio y el ancho efectivo (W_E). Segundo, se deben identificar los valores estimados

(o por defecto), como datos de entrada para el análisis. Básicamente, hay tres fuentes de datos de entrada:

- ◆ Los valores estándar descritos en este documento.
- ◆ Valores o estimaciones derivadas de información local.
- ◆ Valores derivados de información de campo

Una aplicación común de este método es estimar el nivel de servicio de instalaciones que van a cambiar o han cambiado en sus características. Esto sería un análisis operacional y su resultado principal sería el nivel de servicio. Además, el ancho efectivo (W_E) puede ser considerado el resultado principal; de esta manera, sería un análisis de diseño. Si se tiene un valor de nivel de servicio preestablecido, el resultado se utiliza generalmente para estimar la conveniencia de un ancho efectivo dado.

Otro tipo de análisis es el planeamiento, que puede utilizar estimaciones, valores estándar de este documento y valores locales (como datos de entrada) para determinar el nivel de servicio o el ancho efectivo de una instalación peatonal. La diferencia entre análisis de planeamiento, de diseño y operacional es que la mayoría (o la totalidad) de los valores de entrada en planeamiento son estimados o estandarizados. Los análisis operacional y de diseño utilizan valores tomados de información de campo o valores locales conocidos en todas o en la mayoría de sus variables.

1.1.5 Limitaciones de la metodología

En este capítulo, el material es el resultado de la investigación patrocinada

por la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos. La metodología para análisis de andenes a mitad de cuadra no puede determinar los efectos de altos volúmenes peatonales que ingresan en edificios de oficinas o estaciones subterráneas. Tampoco determina los efectos de altos volúmenes vehiculares que entran y salen de un garaje sobre el cruce peatonal. Esta metodología no tiene en cuenta la pendiente longitudinal, ya que se considera válida para pendientes entre $\pm 3\%$.

1.1.6 Requerimientos de espacio

Los diseñadores de zonas e instalaciones peatonales utilizan el cuerpo humano para definir medidas estándares de requerimientos de espacio, al menos implícitamente. Una simple elipse de 0.50 x 0.60 m con un área total de 0.30 m², se usa como el espacio básico que ocupa un peatón, como se muestra en la Figura 1.9. En la evaluación de instalaciones peatonales, se usa un área de 0,75 m² como zona de amortiguación para cada peatón.

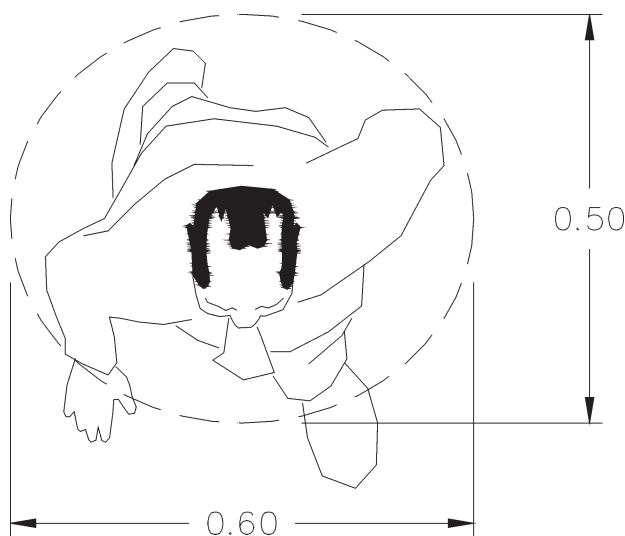


Figura 1.9
Elipse para
requerimientos
de espacio

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

Un peatón que esté caminando necesita cierta cantidad de espacio disponible hacia delante. Este espacio es una dimensión crítica, puesto que determina la velocidad de viaje y el número de peatones que pueden pasar por un punto determinado en un período de tiempo.

1.1.7 Datos de entrada y valores estimados

En la Tabla 1.1 se muestran los valores que pueden ser usados como datos de entrada en el caso en que no haya disponibilidad de información local. Una vez se esté desarrollando el análisis, se debe tener en cuenta que la información de campo es el medio más confiable para obtener parámetros igualmente confiables. Solamente cuando esto no sea posible se deben considerar los parámetros sugeridos en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1
Datos de entrada y valores por defecto para peatones

Parámetro	Valor
Datos geométricos	
Longitud	-
Ancho efectivo	1.5 m
Radio de la esquina	Ver Tabla 1.5, Tabla 1.6 y Tabla 1.7
Longitud cruce	-
Datos de demanda	
Período de análisis	-
No. de peatones en un pelotón	Ver Ecuación 1.3
Velocidad de caminata	1.2 m/s
Tiempo de arranque	3.0 s

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

se estima en 72 m/min (1.2 m/s). Si la población mayor constituye más del 20% del total de la población peatonal, esta velocidad cae a 60 m/min (1.0 m/s). Además, una rampa de 10% o más de pendiente reduce la velocidad en 6 m/min (0.1 m/s). En andenes, la velocidad a flujo libre de los peatones es aproximadamente 90 m/min (1.5 m/s). Existen otros elementos que podrían reducir la velocidad media, como el porcentaje de niños que caminan lentamente en el tráfico peatonal.

Los peatones muestran un rango bastante amplio de velocidades de caminata, las cuales varían desde 48 hasta 108 m/min (0.8 m/s a 1.8 m/s). Los peatones mayores están generalmente en el grupo más lento dentro de este rango. El Manual de Capacidad para Carreteras (HCM-2000) asume una velocidad de 72 m/min para cruces regulados con semáforo. Las velocidades alcanzadas lejos de intersecciones son mayores que en éstas. Se presentan velocidades más altas en los hombres que en las mujeres a su vez, éstas están afectadas por escaleras. La temperatura, la hora del día, el propósito de viaje y las condiciones climatológicas también afectan las velocidades de los peatones.

Sin embargo, según los resultados obtenidos en el Capítulo 6 del Tomo II, Parámetros de tránsito, flujo no motorizado, las velocidades de caminata en nuestro medio pueden sufrir algunas variaciones respecto a las propuestas en el HCM. En la Tabla 1.2 se pueden observar algunos resultados del HCM.

1.1.7.1 Velocidad de caminata

La velocidad a que un peatón camina es altamente dependiente de la proporción de peatones mayores (de más de 65 años) en la población de muestra. Según el HCM, si esta proporción se encuentra entre 0 y 20%, el promedio de velocidad en zonas peatonales

1.1.7.2 Tiempo de arranque y reacción

Un tiempo de arranque de 3 segundos es un valor aceptable para evaluar cruces peatonales en intersecciones semaforizadas. Una capacidad de 75 peat/min/m o 4,500

peat/h/m es un valor lógico para instalaciones peatonales, si no se dispone de información local. En capacidad, el HCM considera una velocidad de caminata de 48 m/min (0.80 m/s) como un valor razonable. En la Figura 1.10 se muestra la distribución típica de velocidades de caminata en terminales.

Estudios previos referentes a los tiempos de percepción y arrancada se han realizado en más de 4,000 peatones disciplinados. La presencia de peatones mayores y muy jóvenes en los pelotones no afectó sus tiempos de arrancada. La Tabla 1.3 muestra un tiempo estándar de arrancada que puede usarse en casos en que no haya disponibilidad de información local.

1.1.7.3 Ancho efectivo

El concepto de carriles peatonales ha sido utilizado para evaluar el flujo peatonal, de manera similar a como se analizan carriles de autopistas. Sin embargo, este concepto de carril no se debe utilizar en un análisis de este tipo, ya que investigaciones previas en Estados Unidos han demostrado que los peatones no caminan en carriles organizados. El concepto de carril es útil solamente para determinar cuántas personas pueden caminar paralelamente en un an-

cho peatonal dado, por ejemplo, en la determinación del ancho mínimo de andén que permita que dos peatones se sobrepasen cómodamente.

Para evitar interferencias cuando un peatón realiza una maniobra de sobrepaso a otro, cada uno debe disponer de 0.80 m de ancho en la zona peatonal. Cuando los peatones caminan juntos (conocidos), cada uno ocupa 0.70 m de ancho, y hay una gran probabilidad de contacto entre ellos, debido a los movimientos al caminar. El menor espaciamiento lateral se da en las situaciones más apretadas (alta densidad de peatones).

Una zona peatonal limpia se refiere a la porción de esa zona que puede utilizarse efectivamente para los movimientos peatonales. Los movimientos peatonales tienden a evitar el bordillo y a no acercarse mucho a las paredes de los edificios cercanos, por lo tan-

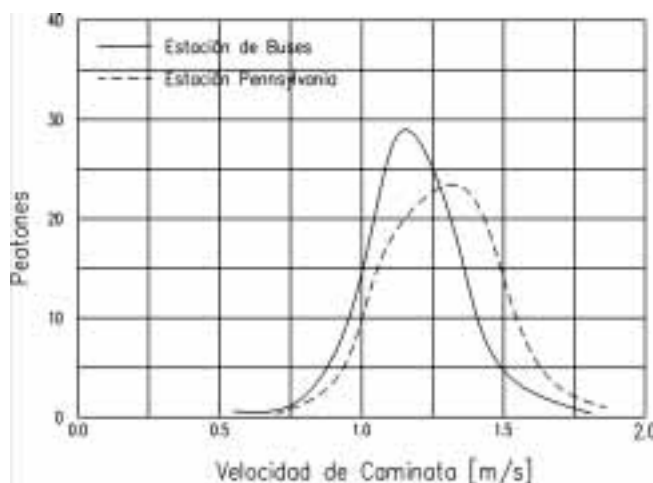


Figura 1.10
Distribución típica de velocidades a flujo libre

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000).

Velocidades	Cruces peatonales m/min	Escaleras m/min	Puentes (aceras) m/min	Rampas m/min
Velocidad promedio	85.91	111.69	82.96	68.83
Percentil 50	85.48	109.76	85.76	81.28
Percentil 85	93.94	126.95	90.93	87.82
Percentil 90	97.99	136.68	93.69	90.04
Velocidad mínima	57.19	80.85	59.49	23.47
Velocidad máxima	147.61	152.44	96.04	96.16

Tabla 1.2
Velocidades de caminata - instalaciones peatonales

Fuente:
elaboración propia.

Tabla 1.3
Tiempos
estándar de
arrancada

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

to, este espacio no utilizado debe ser descontado del ancho total de la zona peatonal. También debe descontarse espacios utilizados por peatones parados cerca de edificios, o cerca de obstáculos físicos, como postes, bolardos, señales, hidrantes, buzones, entre otros tipos de mobiliario urbano.

	Percentil 50	Percentil 85
Hombre joven	1.8 s	-
Mujer joven	2.0 s	-
Hombre mayor	2.4 s	3.7 s
Mujer mayor	2.6 s	4.0 s

Tabla 1.4.
Anchos típicos
de obstáculos
en
instalaciones
peatonales

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

Obstáculo	Ancho aproximado
Mobiliario urbano	
Postes	0.8 - 1.1 m
Postes de señales	0.9 - 1.2 m
Hidrantes	0.8 - 0.9 m
Poste de semáforos	0.6 - 0.8 m
Parquímetros	0.6 m
Buzones	1.0 - 1.1 m
Cabinas telefónicas	1.2 m
Cestas de basura	0.9 m
Bancas	1.5
Árboles	0.6 - 1.2 m
Cajas de plantas	1.5 m
Usos comerciales	
Ventas en la calle	Variable
Exhibiciones de publicidad	Variable
Publicidad de almacenes	Variable
Vitrinas	1.0 m
Extensiones de edificios	
Fachadas	0.5 - 0.7 m
Acceso a edificios	1.5 - 2.1 m
Columnas	0.8 - 0.9 m
Conexiones de bomberos	0.3 m
Garajes	Variable

El grado en que algunos de esos obstáculos afecta la movilidad de los peatones y reduce el ancho efectivo de la vía no está documentado extensamente. Aunque un

solo punto de obstrucción no reduciría el ancho eficaz de una vía peatonal, si tendría un efecto sobre sus áreas vecinas. Existe una gran variedad de obstáculos (Tabla 1.4) sobre una vía peatonal, lo que incomoda el recorrido de los peatones. El ancho efectivo puede calcularse utilizando la Ecuación 1.4.

$$W_E = W_T - W_O \quad 1.4$$

donde

W_E = ancho efectivo total [m]

W_T = ancho total [m]

W_O = suma de anchos debido a obstáculos [m]

Un diagrama esquemático que muestra las obstrucciones típicas y el ancho de una instalación peatonal se observa en la Figura 1.11. En la Tabla 1.4 se muestran valores que pueden utilizarse en caso que no sea posible conocer la configuración de la vía.

La longitud efectiva de un obstáculo generalmente se asume como cinco veces su ancho efectivo. El efecto medio de estos obstáculos, como árboles y postes, debe ser obtenido multiplicando su ancho efectivo por su longitud efectiva y la distancia promedio entre ellos.

En los cruces en intersecciones semaforizadas, es necesario observar los vehículos que realizan el giro derecho en la intersección y ocupan parte del cruce durante su recorrido. Si una parte significativa del cruce no es utilizada por los peatones debido al giro vehicular, el ancho efectivo de este puede ser calculado restando el espacio utilizado por los vehículos en un período dado.

1.1.7.4 Radios en esquinas

El radio de una esquina depende de varios factores, entre los cuales se incluyen la

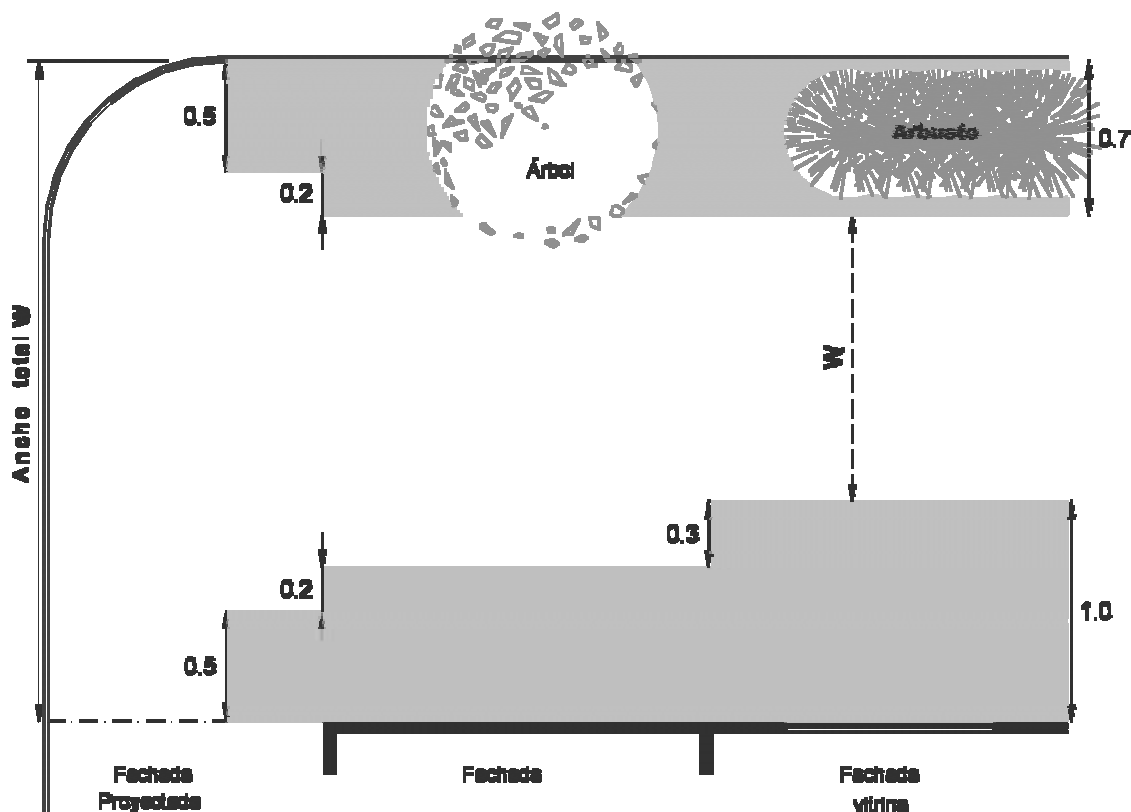


Figura 1.11
Ajustes de ancho debido a obstáculos

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

velocidad del vehículo, el ángulo de la intersección, los tipos y volúmenes de los vehículos que hacen el giro y las restricciones de giro derecho sobre los cruces peatonales. Por ejemplo, el radio recomendado para camiones y buses debe ser mucho mayor que para automóviles. En la Tabla 1.5 se muestran valores que el *Manual de capacidad en carreteras (HCM-2000)* recomienda y que se pueden usar en caso de ausencia de información local.

En nuestro medio, el Decreto 323 de 1992 da una pauta para los radios de giro en esquinas según la tipología de las vías que conforman la intersección. Además, estos valores varían según el desarrollo del sector de la ciudad. En las Tablas 1.6 y 1.7, se muestran estos valores.

Composición vehicular	Radio
Camiones y buses	13.0 m
Automóviles	7.3 m

Tabla 1.5
Radios estándar en esquinas

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

1.1.7.5 Período de análisis

El planeamiento, el diseño, las políticas y los recursos determinan la duración de los períodos de análisis. La duración de un período de análisis típico para peatones cubre intervalos de 15 minutos. Es difícil predecir patrones de flujo en pelotones, basados en un período de análisis más largo. Una instalación peatonal con flujo continuo debe tener varios períodos de análisis a diferentes horas del día con el fin de establecer las variaciones en los flujos direccionales.

Tabla 1.6
Radios en
esquina para
sectores
desarrollados
(M)

	V-0	V-1	V-2	V-3	V-3E	V-4	V-5	V-6	V-7	V-8
V-0	15 10	15 10	15 10	15 10	15 10	12 7	12 7	10 6	10 6	10 6
V-1		15 10	15 10	15 10	15 10	12 7	12 7	10 6	10 6	10 6
V-2			15 10	15 10	15 10	12 7	12 7	10 6	10 6	10 6
V-3				15 10	15 10	12 7	12 7	10 6	10 6	10 6
V-3E					15 10	12 7	12 7	10 6	10 6	10 6
V-4						8 4	8 4	8 4	8 4	8 4
V-5							8 3	6 3	6 3	6 3
V-6								6 3	6 3	6 3
V-7									6 3	6 3
V-8										6 3

Fuente:
Decreto 323 de
1992, Anexo.
Alcaldía Mayor de
Bogotá, D.C.

Tabla 1.7
Radios en
esquina para
sectores no
desarrollados
(M)

	V-0	V-1	V-2	V-3	V-3E	V-4	V-5	V-6	V-7	V-8
V-0	30 25	30 25	30 25	30 25	30 25	15 10	15 10	12 7	12 7	12 7
V-1		30 25	30 25	30 25	30 25	15 10	15 10	12 7	12 7	12 7
V-2			30 25	30 25	30 25	15 10	15 10	12 7	12 7	12 7
V-3				30 25	30 25	15 10	15 10	12 7	12 7	12 7
V-3E					30 25	15 10	15 10	12 7	12 7	12 7
V-4						10 6	10 6	10 6	10 6	10 5
V-5							8 4	8 4	8 4	8 4
V-6								6 3	6 3	6 3
V-7									6 3	6 3
V-8										6 3

Fuente:
Decreto 323 de
1992, Anexo.
Alcaldía Mayor de
Bogotá, D.C.

1.1.8 Flujo continuo en instalaciones peatonales

El flujo continuo en instalaciones peatonales se presenta en las zonas exclusivas y en las compartidas, destinadas para peatones. Este tipo de instalaciones son únicas debido a que los peatones no experimentan interrupciones, excepto la interacción con otros peatones y, en el caso de zonas compartidas, con otros modos de transporte no motorizado. Estos procedimientos deben utilizarse con la velocidad de caminata, el tiempo de arranque y el espacio requerido por peatón, como se describe en el Capítulo 6 del Tomo II.

1.1.8.1 Andenes y senderos peatonales

Este tipo de instalaciones están separadas del tráfico vehicular, y generalmente no permiten la circulación de otros modos de transporte (en el caso de alamedas, si hay ciclorruta, está demarcada y separada de la zona peatonal). Esta infraestructura se construye para servir a peatones en las vías urbanas, aeropuertos, metros y terminales de transporte (estaciones Transmilenio).

Estas instalaciones incluyen tramos rectos en andenes, escaleras y zonas de cruce donde éstas sean necesarias. Esta clase de instalaciones acomoda los más altos volúmenes de peatones de los tres tipos de tráfico continuo tratados en este numeral, y proporciona los mejores niveles de servicio, debido a que los peatones no comparten estas instalaciones con otros modos que pueden viajar a velocidades mayores.

La primera medida de funcionamiento que se toma en este tipo de infraestructura es el espacio, el cual es el inverso de la densidad. El espacio se puede observar directamente en campo teniendo la geometría de la instala-

ción y determinando el número máximo de peatones en un período dado en esa área. La velocidad también puede observarse fácilmente en campo y puede utilizarse como un criterio suplementario para analizar estos tipos de instalaciones. Por simplicidad en la toma de información, el flujo peatonal por unidad de ancho es utilizado como una medida de desempeño. La estimación del periodo pico de 15 minutos y del ancho efectivo son necesarios para calcular este valor del flujo según la Ecuación 1.5.

$$V_p = \frac{V_{15}}{15W_E} \quad 1.5$$

donde

W_E = ancho efectivo total [m]

V_p = flujo peatonal por unidad de ancho [peat/min/m]

V_{15} = periodo pico de 15 minutos [peat/15 min]

La relación volumen/capacidad (v/c) puede calcularse asumiendo 75 peat/min/m para la capacidad. En la Tabla 1.8 se muestran los criterios de nivel de servicio para este tipo de instalaciones, según el HCM y en la Tabla 1.9, se muestran los mismos criterios, pero obtenidos con base en información de campo local (soporte metodológico, Tomo II, Capítulo 6). Aquí se incluye el espacio y los criterios suplementarios de flujo por unidad de ancho (volumen), velocidad de caminata y la relación v/c. En estos valores no se tiene en cuenta el efecto de los pelotones.

Es importante determinar si el efecto de pelotones u otros patrones de tráfico alteran implícitamente los supuestos del flujo promedio en la estimación del nivel de servicio, si estas alteraciones llegaran a presentarse. Aunque en las secciones siguientes se describe el impacto de los pelotones y otros patrones de tráfico en el flujo peatonal, siempre se

Tabla 1.8
Criterios de nivel de servicio para andenes y senderos peatonales HCM
Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

Nivel de servicio	Superficie (m ² /peat)	Volumen (peat/min/m)	Velocidad (m/s)	v/c
A	> 5.6	≤ 16	> 1.30	≤ 0.21
B	> 3.7 - 5.6	> 16 - 23	> 1.27 - 1.30	> 0.21 - 0.31
C	> 2.2 - 3.7	> 23 - 33	> 1.22 - 1.27	> 0.31 - 0.44
D	> 1.4 - 2.2	> 33 - 49	> 1.14 - 1.22	> 0.44 - 0.65
E	> 0.75 - 1.4	> 49 - 75	> 0.75 - 1.14	> 0.65 - 1.00
F	≤ 0.75	Variable	≤ 0.75	Variable

Tabla 1.9
Criterios de nivel de servicio para andenes y senderos peatonales estimados para Bogotá
Fuente: elaboración propia.

Nivel de servicio	Superficie [m ² /peat]	Velocidad media [m/min]	Volumen [peat/m-min]	V/C
A	> 7.00	≥ 97.97	≤ 14	≤ 0.049
B	≥ 1.00	≥ 90.58	≤ 91	≤ 0.317
C	≥ 0.77	≥ 87.99	≤ 115	≤ 0.401
D	≥ 0.40	≥ 77.82	≤ 194	≤ 0.676
E	≥ 0.17	≥ 49.60	≤ 287	≤ 1.000
F	< 0.17	< 49.60	Variable	

dispone del valor de flujo unitario. Las ecuaciones 1.4 y 1.5 se aplican para cualquier tipo de flujo.

Tabla 1.10
Ajuste del criterio de nivel de servicio para pelotones
Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

NS	Espacio (m ² /peat)	Volumen * (peat/min/m)
A	> 49	≤ 1.6
B	> 8 - 49	> 1.6 - 10
C	> 4 - 8	> 10 - 20
D	> 2 - 4	> 20 - 36
E	> 1 - 2	> 36 - 59
F	≤ 1	> 59

* Estos valores representan el flujo promedio en periodos de 5 a 6 minutos.

Efecto de pelotones

Los valores expuestos en la Tabla 1.10 muestran los criterios de nivel de servicio para andenes y zonas peatonales cuando hay pelotones. Algunas investigaciones indican que el flujo impedido empieza en 49 m²/peat, lo que equivale a 1.6 peat/min/m. Este valor se utiliza para el nivel de servicio A. También se indica que el flujo apiñado en pelotones empieza en 1.0 m²/peat, que equivale a 59 peat/min/m. Este sería el nivel de servicio F.

Escaleras

Se han desarrollado criterios para el nivel de servicio en este tipo de instalaciones, basado en los valores estándar del Instituto de Ingenieros de Transporte, los cuales se muestran en la Tabla 1.11. Estos criterios aseguran se cumple que la ecuación fundamental del tránsito. La relación v/c se basa en una capacidad de 49 peat/min/m para escaleras.

En la Tabla 1.12, se muestran los niveles de servicio estimados con base en información tomada en algunas escaleras de la ciudad.

Flujos cruzados

Un flujo cruzado es un flujo peatonal aproximadamente perpendicular a otros flujos peatonales. Entre dos flujos, el más pequeño determina las condiciones de flujos cruzados. Algunas investigaciones han revelado que éstos ocurren en vestíbulos y pasillos. Para analizar este tipo de fenómenos, se utiliza el mismo procedimiento que para estimar

el espacio en andenes y zonas peatonales. Los criterios de nivel de servicio A hasta B pueden ser iguales a los de la Tabla 1.8. Si se observa la presencia de pelotones, se pueden emplear los valores de la Tabla 1.10. En la Tabla 1.13 se muestra el criterio para estimar el nivel de servicio E.

1.1.8.2 Zonas de espera

El espacio medio disponible para peatones también puede aplicarse como la medida principal en estas zonas. En éstas, los peatones se detienen temporalmente esperando ser atendidos. En la Tabla 1.14 se muestran los criterios de nivel de servicio, los cuales se relacionan con el espacio medio disponible por peatón y el grado de movilidad permitido. En multitudes muy densas, hay poco espacio disponible para moverse; sin embargo, la circulación limitada es posible debido a que aumenta el espacio medio por peatón.

1.1.8.3 Zonas peatonales compartidas

Instalaciones peatonales que usan los ciclistas y otros modos de tránsito no motorizado, como patinadores y hasta sillas de ruedas. Estas infraestructuras, construidas generalmente fuera de las vías vehiculares, también proporcionan espacios para la recreación. Estas instalaciones se encuentran en parques y vías peatonales donde el tráfico y parqueo vehicular está restringido. En

nuestro medio podría decirse que no existen zonas exclusivamente destinadas a peatones, ya que la mayoría son de uso compartido. Claro está que según el sector, varía la proporción de otros modos no motorizados.

Nivel de Servicio	Superficie (m ² /peat)	Volumen (peat/min/m)
A	> 49	≤ 1.6
B	> 8 - 49	> 1.6 - 10
C	> 4 - 8	> 10 - 20
D	> 2 - 4	> 20 - 36
E	> 1 - 2	> 36 - 59
F	≤ 1	> 59

Tabla 1.11
Criterio de nivel de servicio para escaleras HCM
Fuente: Manual de capacidad de carreteras

Nivel de servicio	Superficie (m ² /peat)	Volumen (peat/min/m)
A	> 10.20	≤ 13
B	≥ 4.20	≤ 30
C	≥ 2.50	≤ 47
D	≥ 1.65	≤ 65
E	≥ 0.74	≤ 93
F	< 0.74	Variable

Tabla 1.12
Criterio de nivel de servicio para escaleras, estimados para Bogotá
Fuente: elaboración propia, desarrollo metodológico Tomo II, Capítulo 6.

En algunas zonas, las bicicletas (debido a su mayor velocidad de operación) pueden tener un impacto negativo en la capacidad y el nivel de servicio peatonal. Sin embargo, es muy difícil establecer una equivalencia ciclista-peatón, debido a que la relación entre estos dos modos es diferente, dependiendo de sus respectivos flujos, distribución direccional y otros factores.

El criterio principal de nivel de servicio en instalaciones compartidas está basado en

NS	Espacio (m ² /peat)	Volumen * (peat/min/m)	Velocidad (m/s)	Densidad (peat/m ²)
E	> 1.25	≤ 75	≥ 1.0	≤ 0.8

Nota. * Total de flujos mayores y menores.

Tabla 1.13
Criterios de nivel de servicio para flujos peatonales cruzados

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

los obstáculos o impedimentos sobre las vías que influyen en el flujo. La investigación realizada por Hein Botma en 1995¹ estableció los lineamientos básicos para establecer el nivel de servicio para peatones y ciclistas, con base en la frecuencia de sobrepasos (en la misma dirección) y de encuentros (en la dirección opuesta) con otros usuarios sobre vías de 2.4 m de ancho. Debido a que los peatones rara vez alcanzan a otros peatones, el nivel de servicio para peatones en vías compartidas depende de la frecuencia con que el promedio de peatones es sobrepasado por ciclistas. Sin embargo, se deben hacer observaciones de campo para descartar la existencia de una interacción peatón-peatón.

Tabla 1.14
Criterios de nivel de servicio para zonas de espera

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

NS	Espacio (m ² /peat)
A	> 1.2
B	> 0.9 - 1.2
C	> 0.6 - 0.9
D	> 0.3 - 0.6
E	> 0.2 - 0.3
F	= 0.2

La Ecuación 1.6 se utiliza para calcular el número total de eventos de sobrepasos y el número total de eventos de encuentros de bicicletas (en dirección opuesta) por hora por el número promedio de peatones en la vía.

$$F_p = Q_{sb} \left(1 - \frac{S_p}{S_b} \right) \quad 1.6$$

$$F_m = Q_{ob} \left(1 - \frac{S_p}{S_b} \right) \quad 1.7$$

1. Methods to Determine Level of Service for Bicycle Paths and Pedestrian-Bicycle Paths. Transportation Research Record 1502.

donde

F_p = número de eventos de sobrepaso [eventos/h]

F_m = número de eventos de encuentros [eventos/h]

Q_{sb} = volumen de bicicletas en la misma dirección [bic/h]

Q_{ob} = volumen de bicicletas en la dirección opuesta [bic/h]

S_p = velocidad media peatonal [m/s]

S_b = velocidad media de las bicicletas [m/s]

El número total de eventos se calcula según la Ecuación 1.8.

$$F = F_p + 0.5 F_m \quad 1.8$$

donde

F = número total de eventos [eventos/h]

F_p = número de eventos de sobrepaso [eventos/h]

F_m = número de eventos de encuentros [eventos/h]

Los eventos de oposición (encuentros) permiten el contacto visual directo, de modo que las bicicletas que realizan este tipo de eventos tienden a causar menor impedimento a la circulación de los peatones.

Si se asume 90 m/min (1,5 m/s) como el valor por defecto para la velocidad peatonal y 360 m/min (6.0 m/s) para bicicletas y se aplican las ecuaciones mostradas anteriormente, se obtienen los criterios de nivel de servicio para vías compartidas de doble sentido, como se muestra en la Tabla 1.15. El indicador del nivel de servicio para el volumen de bicicletas se aplica solamente para una distribución direccional de 50/50 en vías de 2,4 m de ancho. El nivel de servicio debe basarse en el número total de eventos por hora.

1.1.9 Flujo discontinuo en instalaciones peatonales

Los procedimientos descritos en este numeral se concentran en proporcionar los niveles de servicio para peatones; por tanto, el impacto que éstos causan sobre el tráfico vehicular no está contemplado en estos apartes.

1.1.9.1 Intersecciones semaforizadas

Una intersección de este tipo tiene un cruce peatonal en por lo menos uno de sus accesos. Un cruce en una intersección semaforizada es más complicado de analizar que un cruce en medio de una cuadra, debido a que la intersección involucra flujos peatonales que se encuentran, peatones que cruzan la calle y otros que se quedan esperando el cambio de señal en las esquinas. El nivel de servicio se determina midiendo la demora promedio experimentada por cada peatón. Ésta no está determinada por la capacidad, siempre y cuando el volumen peatonal no sea mayor de 5,000 peat/h. La demora promedio por peatón en un cruce peatonal está dada por la Ecuación 1.9.

$$d_p = \frac{0,5(C-g)^2}{C} \quad 1.9$$

donde

d_p = demora promedio del peatón [s]

g = tiempo efectivo de verde (para peatones) [s]

C = duración del ciclo [s]

La Tabla 1.16 muestra los criterios de nivel de servicio para cruces peatonales en intersecciones semaforizadas, basados en la demora peatonal. Cuando los peatones experimentan una demora de más de 30 segundos, se impacientan y pueden desobedecer las señales. En la Tabla 1.16 también se incluye una guía que

indica la probabilidad de desobediencia de un peatón. En intersecciones con altos volúmenes vehiculares, los peatones tienen una muy baja opción de cruzar cuando no es oportuno; por tanto, en este tipo de intersecciones, la desobediencia baja un poco.

NS	Eventos/h	Volumen de bicicletas/h
A	≤ 38	≤ 28
B	> 38 - 60	> 28 - 44
C	> 60 - 103	> 44 - 75
D	> 103 - 144	> 75 - 105
E	> 144 - 180	> 105 - 131
F	> 180	> 131

* Ancho de vía de 2,4 m y doble sentido; se asume una distribución direccional de 50/50.

Aunque la demora afecta el tiempo de viaje de los peatones, ésta no refleja la función de las esquinas y cruces peatonales, donde está el espacio de zonas de espera (antes de cruzar) y la circulación peatonal, los cuales son importantes. Una esquina o cruce saturado puede afectar la operación vehicular porque se requeriría un tiempo adicional de verde para el cruce y por las demoras debidas a los movimientos de giro. En la Tabla 1.17 se muestran los criterios de nivel de servicio para cruces semaforizados con base en el espacio disponible (ancho de cebra), volumen de peatones y velocidad de cruce de éstos. Estos parámetros fueron obtenidos con base en la información de campo en algunos puntos de Bogotá, D.C.

Nivel de servicio	Demora peatonal (s/peat)	Probabilidad de desobediencia
A	< 10	Baja
B	= 10 - 20	
C	> 20 - 30	Moderada
D	> 30 - 40	
E	> 40 - 60	Alta
F	> 60	Muy alta

Tabla 1.15
Criterios de nivel de servicio para vías peatonales compartidas*

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

Tabla 1.16 Criterios de nivel de servicio para peatones en intersecciones semaforizadas, HCM

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

Requerimientos de área en esquinas

Existen dos tipos de requerimientos de áreas para peatones en las esquinas de las intersecciones. Primero, es necesaria un área de circulación para acomodar el paso de peatones durante el tiempo de verde, los cuales se unen a los que esperan durante el tiempo de rojo sobre la otra calle, mientras que otros peatones circulan por el andén sin cruzarla. Segundo, es necesaria un área de espera para acomodar a los peatones que se detienen durante el tiempo de rojo.

La metodología descrita más adelante puede identificar problemas geométricos que requieren un estudio de campo detallado para tomar posibles medidas de mejoramiento. Éstas pueden incluir la ampliación de los andenes, agregar restricciones a los giros vehiculares y cambiar el ciclo del semáforo. En la Figura 1.12 se muestran las variables requeridas para desarrollar el análisis.

La Figura 1.14 muestra las condiciones de cálculo analizadas de la fase semafórica en la esquina y en el cruce. La condición 1 es la fase de cruce en la calle secundaria durante el tiempo de verde (para vehículos) de la calle principal, con peatones que esperan en el lado de la calle principal durante la fase roja de la calle secundaria. La condición 2 es la situación inversa.

El análisis en esquinas y cruces peatonales compara el tiempo y espacio disponible con la demanda peatonal. El producto del tiempo y espacio (tiempo-espacio) es el parámetro crítico, debido a las limitaciones de espacio y a los controles de tiempo de los semáforos.

Tiempo-espacio disponible en esquinas

El tiempo-espacio total disponible para la circulación y espera en la esquina de la intersección durante el período de análisis es el producto del área neta de la esquina y la duración de este período. En estas esquinas, el período de análisis es un ciclo del semáforo; por tanto, es igual a la duración del ciclo. La Ecuación 1.10 se utiliza para calcular el tiempo-espacio disponible en una esquina de la intersección. En la Figura 1.13 se muestran las dimensiones usadas en la ecuación.

$$TS = C(W_a W_b - 0.215 R^2) \quad 1.10$$

donde

- TS = tiempo-espacio disponible [$m^2 \cdot s$]
 W_a = ancho efectivo del andén A [m]
 W_b = ancho efectivo del andén B [m]
 R = radio de la esquina en el bordillo [m]
 C = duración del ciclo [s]

Tabla 1.17

Criterios de nivel de servicio para peatones en intersecciones semaforizadas

Fuente: elaboración propia, desarrollo metodológico Tomo II, Capítulo 6

Nivel de servicio	Superficie [m^2 /peat]	Velocidad media [m/min]	Volumen [peat/m-min]	V/C
A	> 12.70	= 88.97	= 7	= 0.110
B	= 5.00	= 84.97	= 17	= 0.268
C	= 3.10	= 80.97	= 26	= 0.409
D	= 1.70	= 71.81	= 43	= 0.677
E	= 0.72	= 45.79	= 64	= 1.000
F	< 0.72	< 45.79	Variable	

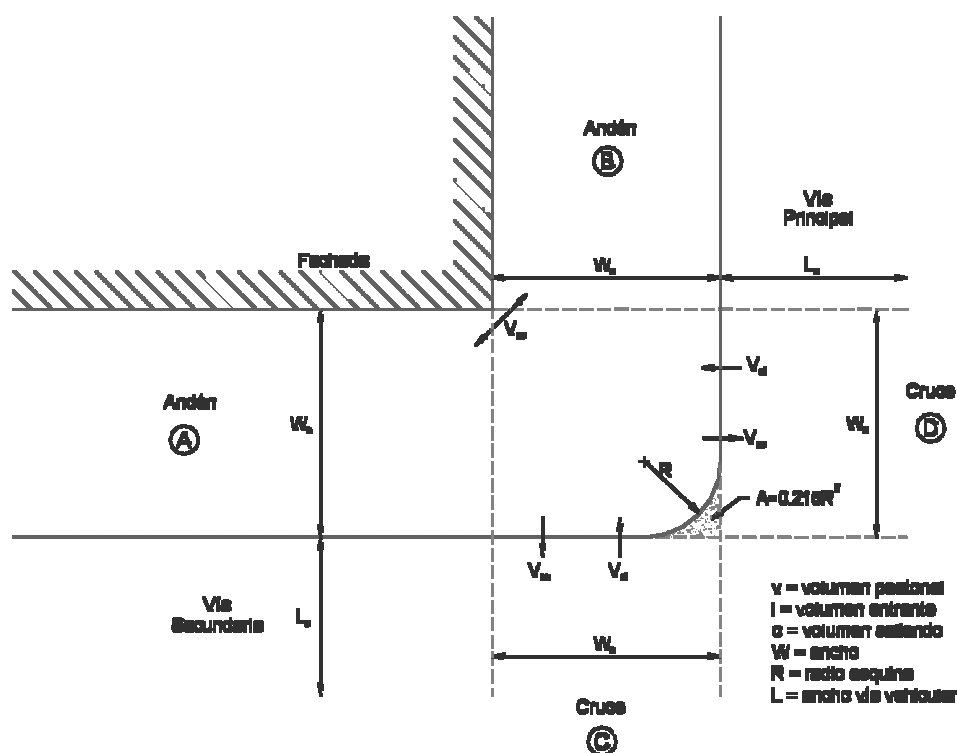


Figura 1.12
Geometría de la intersección y movimientos peatonales

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

Áreas y tiempos de espera

Asumiendo que las llegadas se distribuyen de una manera uniforme en la cola para el cruce, los promedios de tiempo de espera de los peatones pueden calcularse utilizando la Ecuación 1.11 y la Ecuación 1.12. Estas ecuaciones reflejan la proporción del tiempo del ciclo en que los flujos están soportados, así como sus tiempos de espera debido a la fase roja del semáforo.

Para la condición 1, como se muestra en la Figura 1.13, se usa la siguiente ecuación para calcular el tiempo de espera de los peatones para cruzar la calle principal.

$$Q_{tdo} = \frac{v_{do} R_{mi}^2}{2C} \quad 1.11$$

donde

Q_{tdo} = tiempo empleado por los peatones que esperan cruzar la calle

principal durante un ciclo [peat-s]

v_{do} = número de peatones que esperan cruzar la calle principal durante un ciclo [peat/ciclo]

R_{mi} = fase roja o fase de “no cruzar” de la calle secundaria [s]

C = duración del ciclo [s]

Para la condición 2, según la Figura 1.14, se utiliza la siguiente ecuación para calcular el tiempo de espera de los peatones para cruzar la calle secundaria.

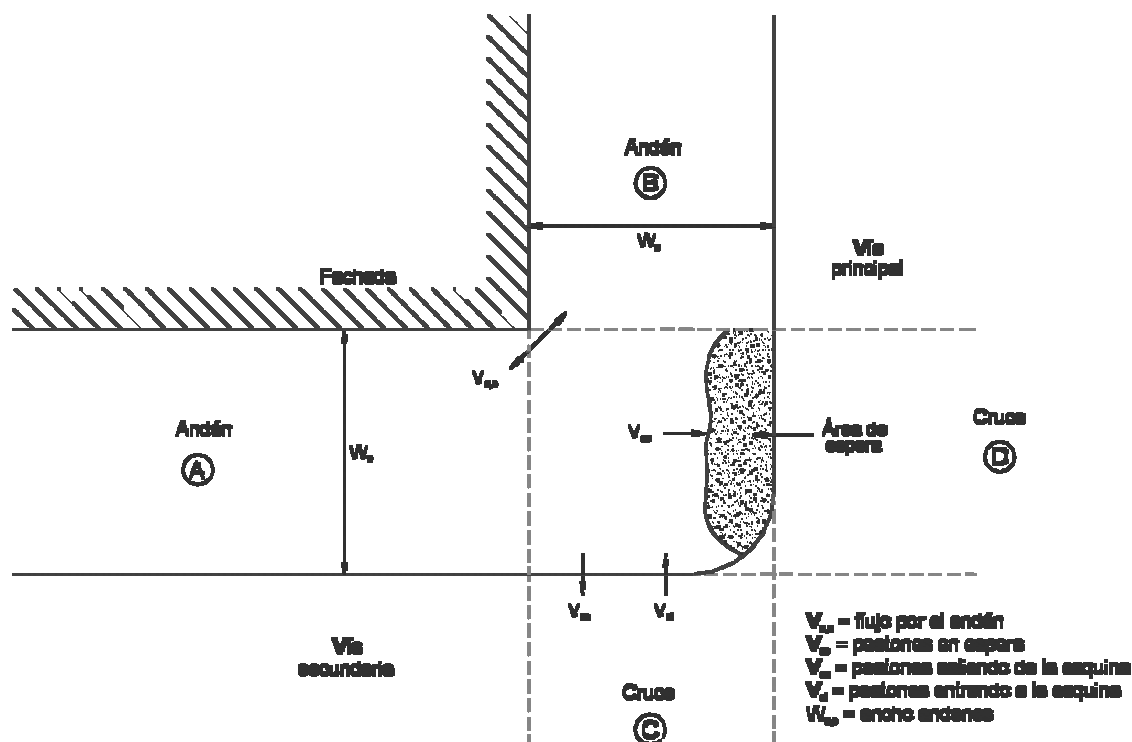
$$Q_{tco} = \frac{v_{do} R_{mj}^2}{2C} \quad 1.12$$

donde

Q_{tco} = tiempo empleado por los peatones que esperan cruzar la calle secundaria durante un ciclo [peat-s]

Figura 1.13
Condición 1:
cruce sobre
la calle
secundaria

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)



- v_{co} = número de peatones que esperan cruzar la calle secundaria durante un ciclo [peat/ciclo]
 R_{mj} = fase roja o fase de “no cruzar” de la calle principal [s]
 C = duración del ciclo [s]

Circulación tiempo-espacio

El tiempo-espacio neto disponible para la circulación peatonal es el tiempo-espacio total menos el tiempo-espacio ocupado por los peatones que esperan cruzar. El área requerida para los peatones que están en espera de cruzar es el producto del tiempo total de espera y del área utilizada por los peatones en espera. La Ecuación 1.13 se utiliza para calcular el tiempo-espacio disponible.

$$TS_c = TS - 0.5(Q_{tdo} - Q_{tco}) \quad 1.13$$

donde

- TS_c = tiempo-espacio total disponible para la circulación peatonal [m²-s]
 TS = tiempo-espacio total disponible [m²-s]
 Q_{tdo} = tiempo empleado por los peatones esperando cruzar la calle principal durante un ciclo [peat-s]
 Q_{tco} = tiempo empleado por los peatones esperando cruzar la calle secundaria durante un ciclo [peat-s]

Espacio peatonal

El espacio requerido para la circulación peatonal se calcula dividiendo el tiempo-espacio disponible para la circulación entre el tiempo que los peatones emplean caminando

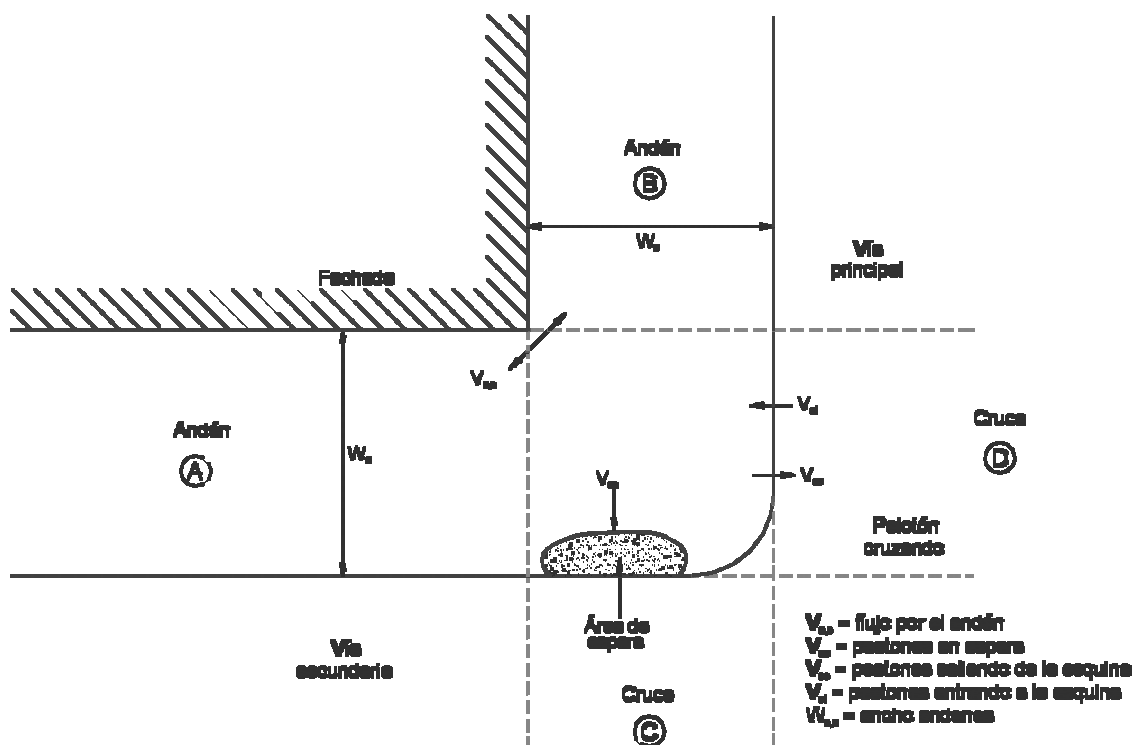


Figura 1.14
Condición 2:
cruce sobre
la calle
principal

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

a través de la esquina, es decir, la suma del volumen total que circula multiplicado por 4 segundos, el cual es el tiempo medio para la circulación. Esto produce el área para cada peatón, la cual está descrita en la Tabla 1.8. La Ecuación 1.14 se utiliza para realizar éste cálculo.

$$M = \frac{TS_c}{4v_{Tot}} \quad 1.14$$

donde

M = área de circulación por peatón [m²/peat]

TS_c = tiempo-espacio total disponible para la circulación peatonal [m²-s]

v_{Tot} = total de peatones que circulan en un ciclo [peat/ciclo]
 $= V_{ci} + V_{co} + V_{di} + V_{do} + V_{a,b}$ (Figuras 1.13 y 1.14)

Tiempo-espacio del cruce peatonal

El tiempo-espacio de un cruce peatonal en una esquina se calcula según la Ecuación 1.15.

$$TS = LW_E \left((CAM + T.A) - \frac{1}{2S_p} \right) \quad 1.15$$

$$\text{o } TS = LW_E \left(G - \frac{1}{2S_p} \right)$$

donde

TS = tiempo-espacio total disponible [m²-s]

L = longitud del cruce [m]

W_E = ancho efectivo del cruce [m]

$CAM+T.A$ = tiempo de verde efectivo para el cruce peatonal [s]

S_p = velocidad promedio de los peatones [m/s]

G = tiempo de verde si no existe semáforo peatonal ($CAM+T.A$) [s]

El análisis del cruce peatonal requiere un flujo peatonal durante el intervalo de duración del ciclo. La Ecuación 1.16 permite calcular el número de peatones que cruzan durante este intervalo. El tiempo total de cruce o el tiempo de verde efectivo requerido para evacuar el cruce se calcula mediante la Ecuación 1.17, que involucra los efectos de dispersión debido a pelotones de más de 15 peatones.

$$N_{ped} = \frac{v(C - G)}{C} \quad 1.16$$

donde

N_{ped} = número de peatones que cruzan durante un intervalo [peat]

v = volumen peatonal [peat/15 min]

G = tiempo de verde si no existe semáforo peatonal (CAM+T.A) [s]

$$t = 3.2 + \frac{L}{S_p} + \left(0.81 \frac{N_{ped}}{W} \right) \text{ para } W > 3.0 \quad 1.17$$

$$t = 3.2 + \frac{L}{S_p} + \left(0.27 \frac{N_{ped}}{W} \right) \text{ para } W = 3.0 \text{ m}$$

donde

t = tiempo total de cruce [s]

L = longitud del cruce [m]

S_p = velocidad promedio de los peatones [m/s]

W = ancho del cruce [m]

3.2 = tiempo de arranque de los peatones [s]

El tiempo total en que se ocupa el cruce es igual al producto del tiempo promedio de cruce por el número de peatones que utilizan el cruce durante un ciclo semafórico. La Ecuación 1.18 se utiliza para realizar esta operación.

$$T = (v_i + v_o)t \quad 1.18$$

donde

T = tiempo total de ocupación del cruce [peat-s]

t = tiempo total de cruce [s]

v_i = volumen peatonal de entrada en el cruce [peat/ciclo]

v_o = volumen peatonal de salida en el cruce [peat/ciclo]

El espacio de circulación provisto para cada peatón se determina dividiendo el tiempo-espacio disponible entre el tiempo total de ocupación del cruce, como se ve en la Ecuación 1.19.

$$M = \frac{TS}{T} \quad 1.19$$

donde

M = área de circulación por peatón [m²/peat]

TS = tiempo-espacio [m²-s]

T = tiempo total de ocupación del cruce [peat-s]

El método del tiempo-espacio permite una estimación aproximada del efecto de los giros vehiculares sobre el nivel de servicio de los cruces peatonales durante un tiempo de verde efectivo. Esto supone un área ocupada (del cruce) por un vehículo, basado en el producto de la trayectoria del vehículo, el ancho del cruce peatonal y un tiempo estimado del espacio de adelantamiento del vehículo. La trayectoria para la mayoría de vehículos es 2.4 m y se puede suponer que el vehículo ocupa el cruce peatonal durante 5 segundos. La Ecuación 1.20 puede utilizarse para estimar el tiempo-espacio ocupado durante los movimientos de giros vehiculares, la cual se resta del valor de tiempo - espacio obtenido de la Ecuación 1.17.

$$TS_{tw} = 12N_{tw}W_E \quad 1.20$$

donde

- TS_{tv} = tiempo-espacio ocupado durante el giro de vehículos [$m^2 \cdot s$]
 N_{tv} = número de vehículos durante la fase verde [vh]
 W_E = ancho efectivo del cruce peatonal [m]

Tiempo de verde efectivo

El tiempo mínimo efectivo de verde que se necesita para una vía de doble sentido se puede estimar utilizando la teoría de “onda de choque” y por observación. Si se presenta un alto volumen peatonal, una “onda de choque” puede asegurar un tiempo adecuado de cruce para grandes pelotones en doble sentido. Sin embargo, para volúmenes bajos, el tiempo mínimo requerido puede estimarse usando la Ecuación 1.10, la cual considera el impacto de pelotones.

Los peatones utilizan tanto el intervalo de verde del semáforo (caminar) como los primeros segundos de la fase roja (no caminar) para entrar en la intersección. Para el cálculo de demoras, en la Ecuación 1.9, el intervalo de tiempo de verde efectivo es igual al intervalo de caminata más los primeros 4 segundos de la señal de “no caminar”.

1.1.9.2 Intersecciones de prioridad

Para este tipo de intersecciones, se aplica otro procedimiento, ya que los peatones que cruzan la vía se enfrentan a un flujo vehicular libre en que algunos accesos no están controlados por señales de “pare”.

El cruce de una intersección de prioridad es más complicado de analizar que uno que se presente a mitad de cuadra, debido a que aquí se involucran flujos peatonales sobre el andén, peatones que cruzan la calle y peatones que esperan una brecha en el tráfico. El

procedimiento para estimar la brecha crítica es similar al utilizado en el numeral 2.2.

La brecha crítica es el tiempo en segundos en que el peatón no intentará empezar a cruzar la calle. Los peatones usan su propio juicio para determinar si la brecha disponible es suficientemente larga para cruzar de manera segura. Si la brecha disponible es mayor que la brecha crítica, se supone que los peatones pueden cruzar; si esto no ocurre, también se supone que los peatones no cruzarán. Para un peatón, la brecha crítica se calcula mediante la Ecuación 1.21.

$$t_c = \frac{L}{S_p} + t_s \quad 1.21$$

donde

- t_c = brecha crítica para un peatón [s]
 S_p = velocidad promedio de caminata [m/s]
 L = longitud del cruce [m]
 t_s = tiempo de arranque del peatón y de salida del cruce [s]

Si se observa la presencia de pelotones, la distribución espacial de los peatones puede calcularse utilizando la Ecuación 1.22 en la determinación de la brecha crítica para el grupo. Para calcular la distribución espacial, se debe recolectar información o estimar el tamaño del pelotón con la Ecuación 1.23. La brecha crítica para grupos se determina con la Ecuación 1.24. Si no hay presencia de pelotones, se supone que la distribución espacial de los peatones es igual a 1.

$$N_p = ENT \left(\frac{0.75(N_c - 1)}{W_E} \right) + 1 \quad 1.22$$

donde

- N_p = distribución espacial de los peatones [peat]

N_c = número total de peatones en el pelotón que cruza [peat]
 W_E = ancho efectivo del cruce [m]
 $0,75$ = ancho efectivo de evacuación por defecto de un peatón para evitar la interferencia con otros peatones

$$N_c = \frac{v_p e^{v_p t_c} + v e^{-v t_c}}{(v_p + v) e^{(v_p - v) t_v}} \quad 1.23$$

donde

N_c = tamaño típico de un pelotón de cruce [peat]
 v_p = volumen peatonal [peat/s]
 v = volumen vehicular [vh/s]
 t_c = brecha crítica para un peatón [s]

$$t_G = t_c + 2(N_p - 1) \quad 1.24$$

donde

t_G = brecha crítica de grupo [s]
 t_c = brecha crítica para un peatón [s]
 N_p = distribución espacial de los peatones [peat]

La demora experimentada por un peatón es la medida del nivel de servicio. La demora promedio de los peatones en el cruce de una intersección de prioridad depende de la brecha crítica y de la tasa de arribos del flujo vehicular al cruce. La demora promedio por peatón en un cruce de este tipo está dada por la Ecuación 1.25.

$$d_p = \frac{1}{v} (e^{w_G} - v t_G - 1) \quad 1.25$$

donde

d_p = demora promedio peatonal [s]
 t_G = brecha crítica de grupo [s]
 v = volumen vehicular [vh/s]

La Tabla 1.18 muestra los criterios de nivel de servicio para peatones en interseccio-

nes de prioridad, basados en la demora promedio. En estas intersecciones, los peatones esperan y toleran demoras más pequeñas que en intersecciones semaforizadas.

1.1.9.3 Senderos peatonales en vías urbanas

En esta sección se tratará el análisis de instalaciones peatonales continuas² con tráfico continuo y discontinuo. La velocidad media de viaje de los peatones (incluidas las paradas) es la medida para estimar el nivel de servicio. Esta velocidad media se calcula con base en la distancia entre dos puntos y la cantidad de tiempo promedio empleado en recorrer esa distancia.

Estas zonas peatonales a lo largo de vías urbanas abarcan diferentes tramos e intersecciones. El primer paso al analizar una vía urbana es definir sus límites, para luego dividirla en tramos y proceder a su análisis. Cada tramo consta de una intersección semaforizada y un tramo de sendero peatonal flujo arriba, que empieza inmediatamente después de la intersección (semaforizada o de prioridad) más cercana. La velocidad media desarrollada en un tramo dado se calcula mediante la Ecuación 1.26.

$$S_A = \frac{L_T}{\sum \frac{L_i}{S_i} + \sum d_j} \quad 1.26$$

donde

L_T = longitud total de la vía urbana en análisis [m]
 L_i = longitud del tramo i [m]
 S_i = velocidad peatonal sobre el tramo i [m/s]

2. Continuo hace referencia a tramos de senderos peatonales continuos a lo largo de una vía urbana.

d_j = demora peatonal en la intersección j [s]

S_A = velocidad media peatonal [m/s]

Muchos factores afectan la velocidad peatonal; por ejemplo, las actividades (diferentes a caminar) que se realizan sobre la vía, los accesos a zonas residenciales y comerciales, obstrucciones laterales, fuertes pendientes, anchos efectivos de la vía y otros factores locales. No existe documentación suficiente que analice sus efectos individuales y colectivos. Las demoras en intersecciones, sin embargo, pueden ser calculadas como se describió anteriormente.

Los criterios de nivel de servicio se basan en la velocidad peatonal y se muestran en la Tabla 1.19.

1.2 CICLORRUTAS

Aunque las bicicletas no operan como los vehículos, ellas tienden a circular en distintos carriles de ancho variable. La capacidad y el nivel de servicio dependen del número de carriles efectivos utilizados por las bicicletas. Esto es mucho más importante que el ancho total de la ciclorruta o de los carriles.

Siempre que sea posible, el análisis de este tipo debe tener en cuenta una evaluación de campo que incluya el número de carriles efectivos utilizados. Según el HCM-2000, cuando esto no sea posible o en el caso en que sea un estudio de planeamiento, el ancho estándar para un carril es 1.20 m. La AASHTO recomienda que para ciclorrutas exclusivas, separadas físicamente de las calzadas vehiculares, el ancho sea 3.0 m, y 2.4 como mínimo, para volúmenes bajos de ciclistas.

Algunas investigaciones en Estados Unidos han demostrado que una ciclorruta con tres carriles de circulación funciona de manera más eficiente que una de dos y da una

mayor calidad en el nivel de servicio. Esto se debe principalmente al aumento de oportunidades para realizar maniobras de sobrepaso y a la mayor facilidad de maniobra alrededor de otros ciclistas y peatones. Así se refuerza la idea de que determinar el número de carriles efectivos en una ciclorruta es el principal dato de entrada para realizar un análisis de capacidad.

NS	Demora peatonal (s/peat)	Probabilidad de desobediencia*
A	< 5	Baja
B	$\geq 5 - 10$	
C	> 10 - 20	Moderada
D	> 20 - 30	
E	> 30 - 45	Alta
F	> 45	Muy alta

* Probabilidad de aceptación de brechas cortas.

NS	Velocidad de viaje (m/s)
A	> 1.33
B	> 1.17 - 1.33
C	> 1.00 - 1.17
D	> 0.83 - 1.00
E	= 0.58 - 0.83
F	< 0.58

Debido a que el nivel de servicio disminuye rápidamente al acercarse a la capacidad, el concepto de capacidad tiene poca utilidad en el diseño y análisis de este tipo de instalaciones, pues rara vez se observan ciclorrutas que operan a capacidad. Los valores de capacidad máxima son reflejo de datos escasos, generalmente de Europa o de simulaciones.

En el HCM-2000 se habla de que algunos estudios en Europa contienen valores de capacidad de 1.600 bic/h/carril para una vía en dos sentidos, y de 3.200 bic/h/carril para vías unidireccionales. Estos valores pueden utilizarse exclusivamente para ciclorrutas que

Tabla 1.18

Criterios de nivel de servicio para peatones en intersecciones de prioridad

Fuente:

Manual de capacidad para carreteras (HCM-2000)

Tabla 1.19

Criterios de nivel de servicio para zonas peatonales en vías urbanas

Fuente:

Manual de capacidad para carreteras (HCM-2000)

operen con tráfico continuo. Sin embargo, no representan condiciones razonables de funcionamiento, lo que puede originar operaciones con un nivel de servicio F. En condiciones de tráfico discontinuo, se recomienda un flujo de saturación de 2.000 bic/h/carril para ciclorrutas unidireccionales.

En muchos países existe una política que promueve el transporte en bicicleta y a pie, especialmente en Europa occidental. Las razones para la promulgación de estas políticas son los problemas que van de la mano con el uso intensivo del automóvil: congestiones, disponibilidad de espacio, polución y ruido. Varios análisis realizados a los patrones de viaje en zonas urbanas han revelado que una gran proporción de éstos son relativamente cortos y que, por lo menos, una parte podría remplazarse por viajes a pie o en bicicleta. Además, caminar o montar en bicicleta pueden ser soluciones viables y eficientes para aumentar el acceso al transporte público, ya sea masivo o colectivo. Todo esto puede ser posible si se hace uso adecuado de la infraestructura disponible y se educa a la gente en temas como movilidad y cultura ciudadana; también existen factores externos, como el clima y la topografía, que pueden hacer inviable proyectos de estas características.

Una forma de promover el uso de la bicicleta es disponer de una infraestructura adecuada y segura para este modo de transporte. Por desgracia, la atención de los gobiernos se ha volcado siempre hacia el tráfico vehicular, tal vez pensando que la movilidad de peatones y ciclistas es muy flexible y puede manejarse aceptablemente sin prestarle mucha atención. Por fortuna, esta mentalidad ha cambiado en los últimos años, especialmente en Bogotá, donde ya se puede ver el esfuerzo de las autoridades en este sentido. Sin embargo, enfrentan otro problema, ya que no

existen metodologías claras de diseño para este tipo de infraestructuras.

1.2.1 Concepto de nivel de servicio

Según el *Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)*, el concepto de nivel de servicio es definido como la medida cualitativa que describe las condiciones operacionales de una corriente de tránsito y su percepción por conductores y pasajeros. La definición del nivel de servicio generalmente describe las condiciones en cuanto a factores como velocidad y tiempos de viaje, libertad de maniobras, interrupciones del tráfico, comodidad, conveniencia y seguridad.

Aunque esta definición no cubre explícitamente a los usuarios de bicicletas, se supone que el concepto también es válido para ellos. Lo importante en esta definición es que la calidad del flujo debe estar determinada por la experiencia del usuario, y no por la autoridad de tránsito.

La cuestión es definir cómo puede caracterizarse la calidad de la operación del tráfico para ciclistas cuando se utiliza la infraestructura, en este caso, la red de ciclorrutas. Un caso diferente ocurre cuando el corredor de ciclorruta comparte espacio con una zona peatonal, ya que el concepto principal para estimar el nivel de servicio peatonal es la densidad, la cual quizá no sea la más apropiada para las bicicletas. Por esta razón, lo más conveniente es determinar criterios de nivel de servicio para ciclistas cuando se dispone de un corredor exclusivo y separado.

El factor inicial podría ser la velocidad media o el tiempo de viaje promedio. Sin embargo, algunos estudios realizados en Europa revelan que la velocidad no está influenciada por el volumen sino cuando los valores de volúmenes de ciclistas son elevados. En este as-

pecto, el comportamiento de una ciclorruta es semejante al de una autopista.

El segundo factor podría ser la densidad. Este criterio se utiliza en el *Manual de capacidad de carreteras* de Alemania. Sin embargo, parece dificultarse la definición de los valores límites entre los diferentes niveles de servicio. Algunos resultados interesantes se han presentado en estudios canadienses, en los que se diferencian tres zonas alrededor de un ciclista: una zona de colisión, una de comodidad y una zona de circulación.

Un tercer factor podría encontrarse en el porcentaje de ciclistas que son forzados a seguir la bicicleta que va delante, debido a la falta de posibilidades de sobrepaso. Sin embargo, en algunos casos, los ciclistas prefieren seguir de cerca la bicicleta de adelante para reducir la resistencia del viento. Este comportamiento no es muy usual en nuestra red de ciclorrutas.

Volviendo al concepto básico de nivel de servicio, los términos “libertad de maniobra”, “comodidad en la marcha” y “conveniencia” se han determinado como se describe a continuación. En un tramo de ciclorruta, se pueden distinguir claramente tres maniobras: sobrepaso a un ciclista (misma dirección), encuentro con un usuario (direcciones opuestas) y combinación de sobrepasos y encuentros. Estas maniobras producen cierta incomodidad o inconveniencia, y pueden implicar un posible riesgo o peligro.

A partir de esta caracterización, se desarrollará el concepto de “interferencia”³ para estimar el nivel de servicio. Es obvio que la cantidad de “interferencias” o presencia de

obstáculos depende del tipo de maniobra, de las partes involucradas y del espacio disponible (ancho de la ciclorruta).

La frecuencia de maniobras podría determinarse con un modelo analítico o uno de simulación. Usando ponderaciones llamadas grados de interferencia⁴, se puede obtener la interferencia total en un tramo para cada tipo de maniobra.

1.2.2 Niveles de servicio

Con las relaciones establecidas entre volumen, ancho de sección y percepción de interferencias, es necesario definir las fronteras para los diferentes niveles de servicio. Según Botma, cuando menos del 10% de los usuarios de una ciclorruta experimentan algún tipo de interferencia a lo largo de 1.0 km, esto puede representar aproximadamente el nivel de servicio A. Los otros niveles de servicio pueden definirse con una escala de porcentaje de interferencias, de manera que el nivel de servicio E cubra el rango de 70% a 100% de interferencia. El nivel de servicio F presentaría condiciones peores que el 100% de los usuarios que experimentan interferencias.

En el estudio Operational Quality of Traffic on a Bicycle Path, se determinaron los correspondientes volúmenes mediante un modelo de simulación. De ahí se concluyó que en ciclorrutas unidireccionales, el porcentaje de interferencia se incrementa de manera lineal con el volumen; en ciclorrutas de doble vía, el incremento es más agudo que lineal.

Según la información mostrada en la Tabla 1.20, el nivel de servicio F no está definido como una congestión de tránsito, sino como un estado en que el 100% de los usuarios experimenta algún tipo de interferencias a lo largo de un tramo de 1.0 km. Esto implica que en las ciclorrutas, el nivel de servicio F empieza a presentarse con un volumen de

3. En inglés se conoce como *hindrance*. Este concepto se refiere a los impedimentos que se presentan al ciclista en la vía, que lo obligan a realizar correcciones en su dirección y velocidad durante el recorrido.

4. Hindrance scores.

usuarios de tan sólo el 20% de su capacidad. Con volúmenes de estas magnitudes, la velocidad media es probablemente apenas menor que con volúmenes más bajos.

Los datos de la tabla 1.20 se basan en el supuesto que la capacidad de las ciclorrutas bidireccionales, debido a la fricción entre movimientos opuestos, es igual a la mitad de la de una ciclorruta unidireccional del mismo ancho de sección. Para ciclorrutas bidireccionales, el nivel de interferencia aumenta rápidamente con el volumen; el nivel de servicio F se puede alcanzar con volúmenes entre el 10 y 13% de la capacidad asumida.

Si se utiliza la densidad como criterio para describir la calidad de la operación a cambio de las interferencias, los resultados pueden ser totalmente diferentes.

Otra forma de definir los niveles de servicio se estimó en el Capítulo 6 del Tomo II, Parámetros de tránsito flujo no motorizado. El resultado se puede ver en la Figura 1.15. Esta gráfica muestra las fronteras que definen los límites de los diferentes niveles de servicio según el volumen de usuarios en la ciclorruta. La curva muestra que a medida que aumenta el flujo, disminuye la velocidad debido a las interacciones entre ciclistas. Cuando se llega al nivel crítico donde hay una gran cantidad de usuarios, el movimiento se empieza

a dificultar y ambos, tanto la velocidad como el flujo, disminuyen.

Según los valores mostrados en la figura anterior, se observa que la velocidad a flujo libre es 18.92 km/h, y la capacidad máxima, sin que se produzca congestión, es 3,243 bic/h.

1.2.3 Calidad del servicio

El criterio de “porcentaje de usuarios que experimentan obstáculos o interferencias en 1.0 km” puede reemplazarse por “la frecuencia de eventos respecto al tiempo”. Parece ser más apropiado utilizar la frecuencia respecto al tiempo que con respecto a la distancia, en especial cuando el concepto es aplicado a usuarios con diferencias sustanciales de velocidades de marcha, como es el caso de los ciclistas.

Los *eventos* son definidos en este estudio como sobrepasos o encuentros. La frecuencia puede ser utilizada como una aproximación para el método de ‘interferencia’ que experimentan los usuarios. Cuando la frecuencia de eventos se incrementa, la calidad de la operación tiende a desmejorar. Debido a que no todos los eventos causan la misma intensidad de interferencia, de alguna forma deberá hacerse una ponderación.

Tabla 1.20
Niveles de servicio de acuerdo con el criterio de interferencia

Fuente:
Method to Determine Level of Service for Bicycle Paths and Pedestrian-Bicycle Paths

Nivel de servicio	Interferencias (sobre 1 km)	Volúmenes	
		Una vía	Doble vía
A	0 - 10%	130	65
B	10 - 20%	260	105
C	20 - 40%	520	170
D	40 - 70%	910	250
E	70 - 100%	1,300	325
F	100%	-	-
Capacidad		6,400	3,200
V/C*		0.20	0.10

* En nivel de servicio E-F

Es fácil entender y observar el significado que la frecuencia de un evento que ocurre cada 15 segundos es cuatro veces por minuto. De esta forma, la frecuencia puede expresarse como el número de eventos por segundo. Por ejemplo, una frecuencia de cuatro veces por minuto puede expresarse como 1/15 eventos por segundo.

Las dimensiones de los carriles en una ciclorruta bidireccional generalmente se encuentran entre 0.75 y 1.00 m. Un tramo estrecho, por ejemplo de 1.50 m de ancho, apenas permite la circulación de dos ciclistas uno al lado del otro. Un ancho mayor permite a los ciclistas viajar fácilmente uno al lado del otro.

Un ciclista experimenta una frecuencia que depende del volumen y de la distribución de la velocidad. Suponiendo que los ciclistas no interfieren entre sí y que la distribución de las velocidades es normal, la frecuencia se puede obtener de la Ecuación 1.27.

$$F = \frac{2qS}{\bar{v}\sqrt{\pi}} \quad 1.27$$

donde

F = frecuencia de eventos [eventos/h]

q = volumen de bicicletas [bic/h]

$\bar{v}$ = velocidad media [km/h]

S = desviación estándar de la velocidad [km/h]

Según el Capítulo 6 del Tomo II, Parámetros de tránsito de flujo no motorizado, utilizando los valores para velocidad media de 17.4 km/h y una desviación estándar de 2.9 km/h, se tiene:

$$F = 0.189q$$

Utilizando este resultado, se calcularon los valores de frecuencia mostrados en la Tabla 1.21.

Utilizando la expresión: $n = 0.0826q + 0.000q^2$, se calcularon de nuevo los valores expuestos en la tabla anterior, obteniendo el siguiente resultado.

Al comparar los valores de frecuencia de eventos de las tablas Tabla 1.21 y Tabla 1.22, se observa que los valores obtenidos con la Ecuación 1.27 son menos estrictos con los niveles de servicio más bajos. Aunque esta es una buena aproximación para definir el nivel de servicio con base en la frecuencia de sobrepasos, aún existe un amplio terreno donde investigar más acerca de estos fenómenos.

Nivel de servicio	Interferencias (sobre 1 Km)	Volumen [bic/h]	Frecuencia
A	0 - 10%	≤ 160	< 1/120
B	10 - 20%	≤ 420	< 1/46
C	20 - 40%	≤ 920	< 1/21
D	40 - 70%	≤ 1,500	< 1/13
E	70 - 100%	≤ 2,150	< 1/9
F	100%	> 2,150	> 1/9

Tabla 1.21
Volúmenes y frecuencia de eventos

Fuente:
elaboración propia.

Nivel de servicio	Volumen [bic/h]	Frecuencia
A	≤ 160	< 1/126
B	≤ 420	< 1/26
C	≤ 920	< 1/7
D	≤ 1,500	< 1/4
E	≤ 2,150	< 1/2
F	> 2,150	> 1/2

Tabla 1.22
Volúmenes y frecuencia de eventos - información local

Fuente:
elaboración propia.

Según Botma, para el nivel de servicio F, la frecuencia es un sobrepaso cada 15 segundos o más; en el caso local, y según los volúmenes definidos en la Figura 1.15, es un sobrepaso cada 9 segundos. Un tiempo promedio de sobrepasos toma aproximadamente 10 segundos; por tanto, en este nivel de servicio, un ciclista pasa alrededor de dos terceras partes del tiempo realizando esta maniobra. En el nivel de servicio A, la frecuencia es menos de un sobrepaso cada 2.5 minutos.

El nivel de servicio F representa condiciones peores que si se presentara un 100% de usuarios que experimentarían interferencias en el camino. Este porcentaje no puede aumentar por definición, pero la interferencia por obstáculos por usuario si se incrementa cuando aumenta el volumen. Esto quiere decir que los rangos del nivel de servicio F van desde el nivel de servicio E hasta la capacidad, pasando por la parte donde el exceso de congestión hace disminuir la velocidad rápidamente (Figura 1.15).

En una ciclorruta de doble vía, dos tipos de eventos son importantes: los sobrepasos y los encuentros. Es probable que los encuentros causen menos impedimentos e interferencias que los sobrepasos debido a que en el primer evento, ambas partes (los ciclistas) involucradas pueden anticiparse al evento y reaccionar a la maniobra con suficiente antelación. Por otro lado, la velocidad relativa de un encuentro es mucho mayor que en un sobrepaso, razón por la cual el miedo subjetivo a un accidente también puede ser mayor.

Como estimación preliminar, se podría decir que un ‘encuentro’ tiene la mitad del peso que un ‘sobrepaso’. Esta aproximación podría influir en los resultados y debería ser investigada. Esta ponderación puede tenerse en cuenta dividiendo en dos la frecuencia de los ‘encuen-

tros’ antes de adicionar la frecuencia de los ‘sobrepasos’.

1.2.4 Funcionamiento

Es evidente que la posición lateral del ciclista es un aspecto importante para los sobrepasos. Por tanto, se estudiaron las velocidades, la posición lateral y la posición lateral durante el sobrepaso.

Se realizó una investigación para conocer los efectos de estos fenómenos en la circulación en una ciclorruta.

1.2.4.1 Sobrepasos y circulación en pares

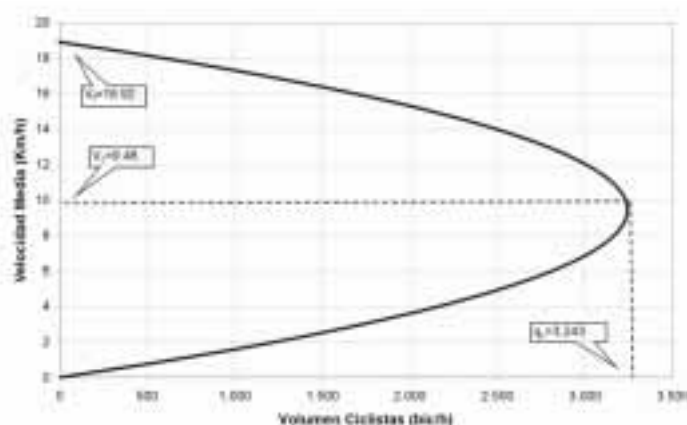
Las maniobras de sobrepaso o la circulación de ciclistas en pares (en paralelo y en la misma dirección) pueden ser los causantes de serias alteraciones y tener gran influencia en el nivel de servicio de la ciclorruta.

La información de sobrepaso descrita en “Traffic Operation of Bicycle Traffic”, fue tomada en una sección transversal dada. Se empleó un procedimiento especial para describir la trayectoria de las maniobras de sobrepaso utilizando la sección transversal como base. Este procedimiento se describe a continuación.

En primera instancia, se deben determinar las pautas o umbrales de los sobrepasos o de la circulación en pares. Del resultado del estudio realizado por Botma, se seleccionaron 50 sobrepasos y 50 circulaciones en pares, y se calcularon los umbrales con un percentil bajo. Los resultados fueron:

- ♦ Los sobrepasos ocurren si la diferencia en velocidad

Figura 1.15
Niveles de servicio



Fuente:
elaboración
propia.

entre los ciclistas es más de 0.5 m/s (1.8 km/h). Por razones prácticas, se introdujo un segundo umbral: la maniobra de sobrepaso tuvo que ocurrir dentro de una distancia de 50 m del sitio de medición.

- ♦ La circulación en pares ocurre cuando la diferencia de velocidades es menor de 0.5 m/s y el intervalo es menos de 0.125 segundos.

Con estos parámetros de partida, todas las bicicletas que pasan a cierta distancia del punto de aforo pueden ser determinadas calculando la intersección de las trayectorias. Esto se indica como el punto de paso, bajo el supuesto que la velocidad del ciclista que hace el sobrepaso y del que sobrepasan es constante durante toda la maniobra e igual a la velocidad observada en el punto de aforo. Las maniobras de sobrepaso sólo fueron seleccionadas para análisis posteriores, si el valor de la distancia entre el punto de sobrepaso y el punto de toma de la información es menor a 50 m.

1.2.4.2 Trayectoria de sobrepaso

Para determinar las trayectorias de las maniobras de sobrepaso, en "Traffic Operation of Bicycle Traffic", se seleccionaron tres ubicaciones donde el ancho de los corredores fuera combinado. De la totalidad de las maniobras de sobrepaso que cumplen con los umbrales descritos anteriormente, se tiene:

- ♦ Las velocidades individuales y las diferencias de velocidad entre el ciclista que so-

brepasa y el que es sobrepasado en el sitio de aforo.

- ♦ La posición lateral individual, tanto del ciclista que hace el sobrepaso como del que es sobrepasado en el punto de aforo, y consecuentemente las diferencias en esta posición.
- ♦ Las distancias desde el sitio de aforo hasta el punto de sobrepaso.

En segunda instancia, se seleccionó un tramo de aproximadamente 100 m de longitud, con el punto de aforo en el centro. Este tramo, que va desde -50 hasta +50 m, fue dividido en 33 subsecciones de 3.0 m cada una. En éstas se determina la diferencia en la posición lateral entre la bicicleta que hace el sobrepaso y la que es sobrepasada. Estas diferencias varían entre -1.20 y +2.25 m.

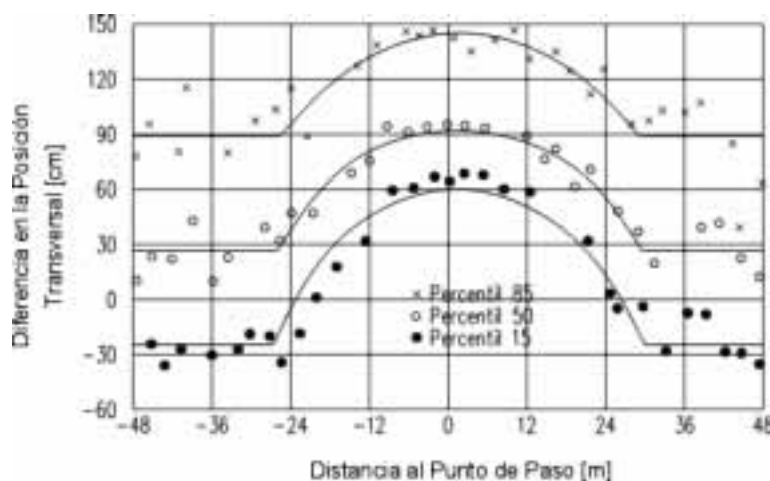
La distribución de la posición lateral en cada subsección fue comparada con la primera subsección, localizada a -48 m desde el sitio de aforo con la ayuda del test de Kolmogorov-Smirnov. Las primeras subsecciones mostradas no presentaron diferencias significativas, ya que aún no se realizaba la maniobra de sobrepaso. Esta maniobra empieza a aparecer aproximadamente a 27 m antes del punto de sobrepaso, donde se halló la primera diferencia significativa con la inalterada primera subsección. Posteriormente, 30 m adelante del punto de sobrepaso, la maniobra termina. En la Figura 1.16 se muestran los percentiles 15, 50 y 85, que describen la trayectoria de la maniobra de sobrepaso. En la Tabla 1.23 se muestran

Ancho	Sobrepasos	Subsecciones	Maniobra de sobrepaso con relación al punto de aforo		Tiempo prom. de sobrepaso
			Inicio	Fin	
2.40	1,178	33 (x 3 m)	-27 m	+30 m	11.0 s
1.80	192	15 (x 6 m)	-12 m	+12 m	4.5 s

Tabla 1.23
Características de las maniobras de sobrepaso

Fuente:
Traffic Operation
of Bicycle Traffic

Figura 1.16
Trayectoria
de maniobras
de
sobrepasos



Fuente:
Traffic Operation of
Bicycle Traffic

los valores característicos de las maniobras de sobrepaso para ciclorrutas de diferentes anchos.

Este mismo procedimiento se utilizó en una pista de 1.80 m de ancho. Sin embargo, el tamaño de la muestra y, por tanto, el número de maniobras de sobrepaso fue mucho menor.

La trayectoria de la maniobra de sobrepaso indicada en la Figura 1.16 está determinada por la bicicleta que hace el sobrepaso. La bicicleta sobrepasada conserva una trayectoria recta durante la maniobra.

Posición lateral

En el documento “Traffic Operation of Bicycle Traffic”, del Transportation Research Record 1320, define la posición lateral de una bicicleta como la distancia al borde derecho del pavimento de la ciclorruta. La posición lateral es de especial importancia ya que define el efecto de rechazo que causa cualquier sardinel o bordillo sobre la posición. El efecto que causan los obstáculos situados en el bordillo, o adyacentes al corredor, no fueron investigados en este estudio.

Realizando un análisis en la distribución de las posiciones laterales, se hizo una dife-

renciación entre los ciclistas libres y los que no lo están. Los libres se definieron en este contexto como los que tienen un intervalo, tanto al frente como en la parte posterior, de al menos 2.5 segundos. Este valor se obtuvo de la observación directa.

Los resultados del análisis a la distribución de la posición lateral de las bicicletas en un corredor se muestran en la Tabla 1.24.

Para percentiles menores al 50%, existe una pequeña diferencia entre los ciclistas libres y los que no lo están. Esto quiere decir que para los ciclistas, el borde (bordillo o sardinel) es el factor determinante para elegir la posición lateral observada.

La Tabla 1.25 muestra los resultados de los percentiles más bajos para bicicletas de la distribución de posición lateral. El hallazgo más importante realizado en este ejercicio fue conocer que el efecto “separador” de bordillos de más de 0.10 m de altura no es mayor que el efecto que causan unos menos altos. Sin embargo, aún debe decidirse cuál percentil debe escogerse para incorporar el efecto del bordillo en las prácticas de diseño.

Por otro lado, se analizaron 450 pares de bicicletas. El hallazgo más importante fue que no se encontró evidencia que este fenómeno esté influenciado por la velocidad en la posición lateral relativa de las dos bicicletas circulando en pares, ni en la posición lateral del par como tal. La diferencia en la posición lateral de pares de bicicletas es claramente menor cuando hacen un sobrepaso, con un promedio de 0.65 m, en comparación con los 0.90 m de las bicicle-

tas que hacen un sobrepaso, como se muestra en la Figura 1.17.

1.2.4.3 Estimación de la capacidad con base en intervalos

La capacidad ha sido estimada utilizando una extrapolación con base en una relación entre el volumen y la densidad. En este aparte, la capacidad es estimada utilizando una descomposición del flujo en dos tipos de ciclistas: los libres y los no libres.

Los otros supuestos de este método se muestran a continuación.

- Con el incremento del volumen, cada vez más ciclistas son obligados a seguir la bicicleta que va al frente. Cuando la instalación funciona a capacidad, ningún ciclista es libre.
- La distribución de los intervalos de los ciclistas no libres en volúmenes que circulan bajo la capacidad de la pista es la misma que a capacidad.
- El método de dividir en dos categorías los ciclistas funciona correctamente.

El tráfico en bicicletas requiere un ajuste en la definición del intervalo, debido a que en el flujo de bicicletas no puede ser ubicado en carriles plenamente definidos. Un par de bicicletas que circulan en forma paralela (una al lado de la otra) tendrían un intervalo pequeño, aunque estos usuarios no sintieran restricciones en sus movimientos.

Para solucionar este inconveniente, se escogió una sección transversal, la cual se dividió en subcarriles de 15.6 cm de ancho cada uno. El subcarril utilizado por una bicicleta es conocido. La bicicleta más cercana que vaya delante de la de estudio y que haya usado cualquiera de los cinco subcarriles alrededor del subcarril de la bicicleta

en cuestión, fue definida como la “bicicleta en frente”, y se utilizó el intervalo con respecto a esta bicicleta. Esta definición se muestra en la Figura 1.18, donde la bicicleta 7 está en frente de las bicicletas 6, 9, 8, 5 y 10. Una característica de esta definición es que cada bicicleta tiene un intervalo, pero algunas no tienen bicicletas detrás, como las bicicletas 1 y 11.

Ancho [m]	Distancia [m]
1.80	0.70
2.40	0.83
2.50	0.74
2.70	0.84

Tabla 1.24

Percentil 50 de posición lateral para bicicletas

Fuente:
Traffic Operation of Bicycle Traffic

Ancho [m]	Altura bordillo [m]	Efecto separador			
		Pauta	Percentiles		
			P-1	P-5	P-10
1.80	0.05	0.25	0.31	0.41	0.47
2.40	0.10	0.50	0.32	0.42	0.49
2.50	0.03	0.25	0.20	0.34	0.41
2.70	0.00	0.25	0.21	0.38	0.47
3.00	0.00	0.25	0.28	0.41	0.51

Tabla 1.25

Efecto de la altura del bordillo en la posición lateral

Fuente:
Traffic Operation of Bicycle Traffic

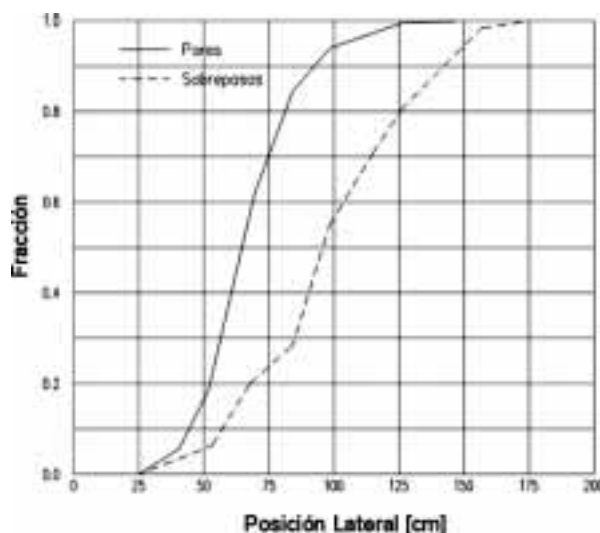
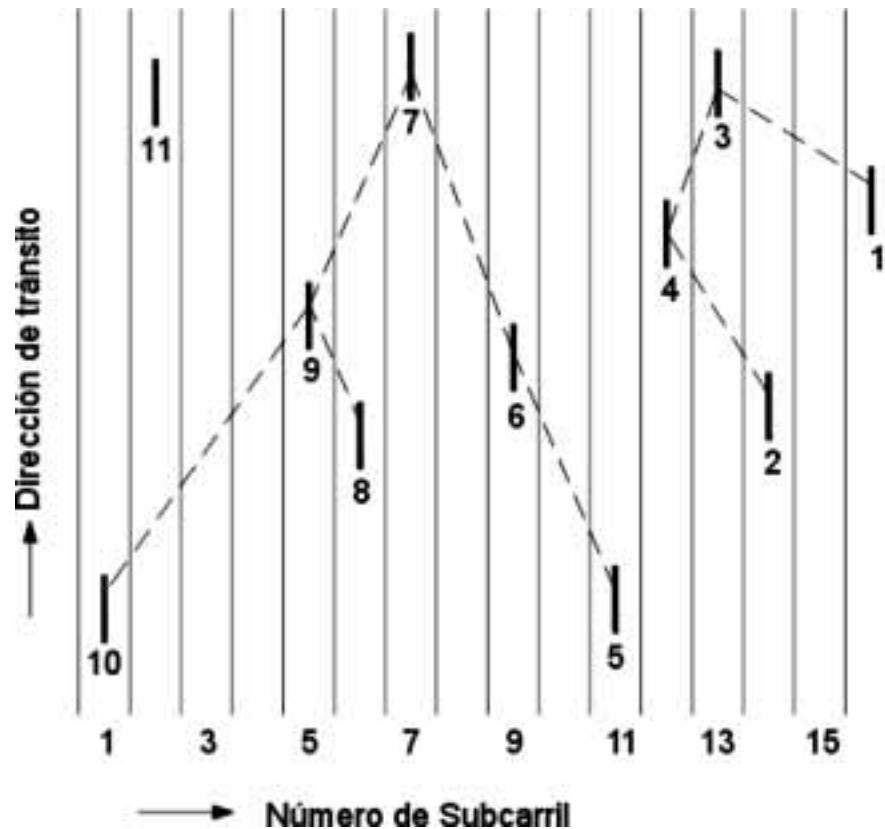


Figura 1.17
Distribución de la diferencia en la posición lateral de pares

Fuente:
Traffic Operation of Bicycle Traffic.

Figura 1.18
Definición del
intervalo para
estimar la
capacidad



Fuente:
elaboración
propia.

Esta definición, extraída del ejercicio realizado por Botma, implica un carril de 0.78 m (5 x 15.6 cm). En consecuencia, la capacidad estimada se refiere a este ancho en primera instancia. La capacidad para el ancho total de una pista puede calcularse multiplicando el número de bicicletas aforadas por el número de subcarriles y dividiendo luego este valor

entre cinco. Las capacidades estimadas según el ancho de pista se presentan en la Tabla 1.26.

La capacidad para un carril de 0.78 m en una zona urbana varía entre 3,000 y 3,500 bic/h. Los resultados de esta tabla pueden complementarse con los niveles de servicio expuestos en la Figura 1.15.

Tabla 1.26
Resultados de
la estimación
de capacidad

Ancho [m]	Capacidad (0.78 m) [bic/h]	Error estándar [%]	No. de subcarriles	Capacidad de pista [bic/h]
1.80	3,300	2.9	9	5,900
2.40	2,990	2.2	14	8,400
2.50	3,490	1.8	14	9,800
2.70	3,090	2.4	14	8,600
3.00	5,300	1.0	16	17,000

Fuente: Traffic
Operation of Bicycle
Traffic

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Manual de Capacidad para Carreteras 2000 (HCM-2000). Transportation Research Board, 2000
- Recomendaciones para el Diseño de Glorietas en Carreteras Suburbanas. Dirección General de Carreteras, Madrid, 1995
- Roundabouts An Informational Guide, Federal Highway Administration, Junio de 2000.
- An Enhanced Program to Model Capacities, Queues and Delays at roundabouts, Transport Research Laboratory (TRL), 1985
- Transit Capacity and Quality of Service Manual, Transportation Research Board, 1999
- Traffic Operation of Bicycle Traffic, Transportation Research Record 1320, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1991.
- Method to Determine Level of Service for Bicycle Paths and Pedestrian-Bicycle Paths, Transportation Research Record 1502, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1996.

2

Capacidad y Niveles de Servicio, flujo continuo

CONTENIDO

2.1	EVOLUCIÓN Y FILOSOFÍA DEL HCM	2-7
2.1.1	Niveles de aplicación	2-10
2.1.2	Estructura del HCM 2000	2-11
2.2	DEFINICIONES	2-11
2.2.1	Capacidad	2-11
2.2.2	Niveles de servicio	2-12
2.3	CORRIENTES VEHICULARES CONTINUAS	2-13
2.3.1	Vías de dos carriles	2-13
2.3.1.1	Metodología	2-15
2.3.2	Vías multicarriles	2-18
2.3.2.1	Características físicas y funcionales	2-18
2.3.2.2	Condiciones básicas para el análisis	2-19
2.3.2.3	Metodología	2-20
2.3.3	Secciones básicas de autopistas	2-32
2.3.3.1	Características físicas y funcionales	2-32
2.3.3.2	Condiciones básicas para el análisis	2-33
2.3.3.3	Metodología	2-34
2.3.4	Rampas de convergencia y divergencia	2-47
2.3.4.1	Características físicas y funcionales	2-47
2.3.4.2	Condiciones básicas para el análisis	2-49
2.3.4.3	Metodología	2-50
2.3.5	Tramos de entrecruzamiento	2-57
2.3.5.1	Características físicas y funcionales	2-57
2.3.5.2	Condiciones básicas para el análisis	2-63
2.3.5.3	Metodología	2-64
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	2-82

FIGURAS

Figura 2.1	Principales elementos de la estructura vial en corrientes continuas	2-13
Figura 2.2	Vía de dos carriles. Esquema	2-15
Figura 2.3	Vía de múltiples carriles	2-19
Figura 2.4	Esquema metodológico para el análisis de vías multicarriles	2-21
Figura 2.5	Curvas velocidad media-volumen para límites de nivel de servicio según densidad.	2-23
Figura 2.6	Curvas de capacidad contra volumen, caso Bogotá	2-32
Figura 2.7	Segmento o sección básica de autopista	2-34
Figura 2.8	Esquema metodológico para el análisis de secciones básicas de autopista	2-35
Figura 2.9	Curvas velocidad - flujo y niveles de servicio en segmentos básicos de autopista	2-37
Figura 2.10	Rampas de convergencia y divergencia	2-48
Figura 2.11	Área de influencia para rampas de convergencia	2-49

Figura 2.12	Área de influencia para rampas de divergencia	2-49
Figura 2.13	Esquema metodológico para el análisis en rampas de convergencia y divergencia	2-51
Figura 2.14	Modelo de cálculo de capacidad en rampas de convergencia	2-53
Figura 2.15	Tramos de entrecruzamientos	2-59
Figura 2.16	Tramos de entrecruzamientos	2-59
Figura 2.17	Tramos de entrecruzamiento	2-60
Figura 2.18	Máximo número de carriles por vehículo - entrecruzamientos Tipo A	2-61
Figura 2.19	Tramos de entrecruzamiento Tipo B	2-62
Figura 2.20	Máximo número de carriles por vehículo - entrecruzamientos Tipo B	2-62
Figura 2.21	Entrecruzamiento tipo C	2-63
Figura 2.22	Máximo número de carriles por vehículo - entrecruzamientos tipo C	2-64
Figura 2.23	Metodología para el análisis de tramos de entrecruzamiento	2-65
Figura 2.24	Diagrama de tramo de entrecruzamiento	2-68

TABLAS

Tabla 2.1	Parámetros que determinan los niveles de servicio en el HCM-2000	2-10
Tabla 2.2	Organización del HCM 2000	2-12
Tabla 2.3	Cálculo de la velocidad que determina el nivel de servicio en el manual colombiano	2-17
Tabla 2.4	Velocidad en km/h que determinan los niveles de servicio por tipo de terreno	2-18
Tabla 2.5	Criterios para la determinación de los niveles de servicio en vías multicarriles	2-23
Tabla 2.6	Factor de ajuste por ancho de carril	2-24
Tabla 2.7	Factor de ajuste por distancia libre lateral	2-25
Tabla 2.8	Factor de ajuste por tipo de separador	2-25
Tabla 2.9	Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso	2-26
Tabla 2.10	Factores de equivalencia para segmentos extensos de autopistas	2-28
Tabla 2.11	Factor de ajuste por pendientes específicas de ascenso para buses y camiones	2-29
Tabla 2.12	Factor de ajuste por pendientes específicas de ascenso para vehículos recreativos	2-30
Tabla 2.13	Factor de ajuste por pendientes en descenso para buses y camiones	2-31
Tabla 2.14	Niveles de servicio en segmentos básicos de autopista	2-36
Tabla 2.15	Criterios para la determinación del nivel de servicio en segmentos básicos de autopista	2-38
Tabla 2.16	Factor de ajuste por ancho de carril	2-39
Tabla 2.17	Factor de ajuste por distancia libre lateral	2-40
Tabla 2.18	Factor de ajuste por número de carriles	2-40
Tabla 2.19	Factor de ajuste por densidad de intercambiadores	2-40
Tabla 2.20	Factores de equivalencia de vehículos de pasajeros en segmentos básicos extendidos	2-43
Tabla 2.21	Factor de ajuste por pendientes específicas de ascenso para buses y camiones	2-45
Tabla 2.22	Factor de ajuste por pendientes específicas de ascenso para vehículos recreativos	2-46
Tabla 2.23	Factor de ajuste por pendientes específicas de descenso para buses y camiones	2-46
Tabla 2.24	Niveles de servicio en rampas	2-52
Tabla 2.25	Capacidad aproximada en rampas de uno y dos carriles	2-52
Tabla 2.26	Selección de la ecuación para autopistas de seis carriles	2-53

Tabla 2.27	Capacidad máxima para rampas de convergencia·	2-54
Tabla 2.28	Selección de la ecuación para autopistas de seis carriles	2-55
Tabla 2.29	Capacidad máxima para rampas de divergencia·	2-56
Tabla 2.30	Longitudes recomendables para carriles de desaceleración	2-57
Tabla 2.31	Longitudes recomendables para carriles de aceleración	2-58
Tabla 2.32	Longitudes de carriles de almacenamiento	2-58
Tabla 2.33	Niveles de servicio en tramos de entrecruzamiento·	2-66
Tabla 2.34	Determinación del tipo de configuración de entrecruzamiento	2-68
Tabla 2.35	Constantes para el cálculo de factores de intensidad de entrecruzamientos	2-70
Tabla 2.36	Criterios de operación de tramos de entrecruzamiento	2-71
Tabla 2.37	Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-73
Tabla 2.38	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-74
Tabla 2.39	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-75
Tabla 2.40	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-76
Tabla 2.41	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-77
Tabla 2.42	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-78
Tabla 2.43	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-79
Tabla 2.44	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-80
Tabla 2.45	(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento	2-81

La capacidad en tránsito se refiere al movimiento de vehículos y personas (ya sea que circulen a pie o en bicicleta) por un tipo de infraestructura dado con características particulares. La capacidad depende del volumen del tránsito, de su forma de operar y de las interacciones de las concentraciones de tránsito y el flujo vehicular.

Mientras que el concepto de capacidad se basa principalmente en datos técnicos y numéricos, el concepto de nivel de servicio es la forma general de evaluar el desempeño de cierta infraestructura desde el punto de vista del usuario. La calidad del nivel de servicio en tránsito refleja dos aspectos importantes: el primero hace referencia al grado de disponibilidad de la infraestructura en ciertos períodos y lugares; el segundo aspecto habla de la comodidad y conveniencia (calidad) del servicio proporcionado a los usuarios.

Las medidas tradicionales del nivel de servicio y la capacidad tienen como objetivo dos aspectos fundamentales. El primero consiste en la medida tradicional de la calidad de servicio en vías y autopistas, la cual está orientada hacia los vehículos y personas, quienes son los usuarios de esas instalaciones. El segundo objetivo está relacionado con las medidas de desempeño económico de la in-

fraestructura vial con el fin de evaluar el tránsito y transporte de una ciudad o región.

En este capítulo se recoge la vasta experiencia obtenida por el Transportation Research Board, descrita en el *Manual de capacidad para carreteras (HCM-2000)*, en el análisis de capacidad y nivel de servicio, así como la experiencia reconocida del país en infraestructuras viales con características de flujo continuo. Se plantea la adaptación de las metodologías expuestas en este documento al entorno local, considerando que la aplicación de modelos obtenidos para condiciones de circulación diferentes, con conductores habituados culturalmente a comportamientos más rígidos y operando en una infraestructura con un alto nivel de mantenimiento, deben valorarse con el criterio del especialista de tránsito y en función de las limitaciones que las metodologías puedan incorporar para su aplicación en el medio urbano.

2.1 EVOLUCIÓN Y FILOSOFÍA DEL HCM

Durante los años de 1930 y de 1940, cuando la ingeniería de tránsito llegaba a la mayoría de edad, hubo gran inquietud por cuantificar el diseño de las vías con respecto al tránsito que iban a servir y, de cierto modo,

convertir el arte de la Ingeniería de tránsito en una verdadera técnica. La demanda de tránsito, expresada en volumen, debía satisfacerse con una oferta de tránsito expresada también en volumen, que se llamaría capacidad vial. Entonces sería posible diseñar los elementos geométricos y de regulación de la circulación para proporcionar una capacidad, en vehículos por hora, superior a los vehículos por hora que pasarían por la vía en el año de diseño y evitar que ocurriera la temida congestión de tránsito.

Existían diversos procedimientos teóricos que estimaban la capacidad vial basados en principios racionales, pero el fenómeno comprendía tantas variables desconocidas (especialmente en lo tocante a las reacciones humanas) que se pensó que lo más práctico sería elaborar un procedimiento basado mayormente en datos tomados en el terreno, que establecieran relaciones empíricas entre las características del tránsito y las vías, y la capacidad de éstas. En Estados Unidos, la tarea de crear ese procedimiento fue acometida por el Bureau of Public Roads (que hoy se llama Federal Highway Administration), dirigida por Olav Koch Normann. El fruto de esa labor fue el primer *Manual de capacidad vial* estadounidense (*Highway Capacity Manual* o HCM), que vio la luz en 1950.

El HCM fue un éxito de librería y se tradujo a los principales idiomas del mundo, incluso el castellano. En 1965 la Highway Research Board de Estados Unidos (que hoy se llama Transportation Research Board o TRB), con el apoyo del Bureau of Public Roads, preparó una segunda edición del *Manual de capacidad vial*. Esta versión del manual introdujo el concepto de nivel de servicio. Veinte años después, en 1985, la TRB publicó la tercera edición, y en 1994 editó una actualización de ocho capítulos del

HCM. Finalmente se proyectó una edición completamente nueva para el año 2000.

El organismo que tiene a su cargo la preparación de esos manuales es el Comité de Capacidad Vial de la TRB, que es parte de la Academia de Ciencias de Estados Unidos. El comité se compone de una veintena de miembros honoríficos y está integrado por especialistas en capacidad vial que proceden principalmente de entidades gubernamentales, universidades y empresas consultoras de Estados Unidos y de otros países industrializados. El comité dirige las investigaciones sobre capacidad vial que realizan consultores patrocinados por la TRB y toma decisiones sobre el material que se va a incorporar al HCM, producto de estas investigaciones y de las realizadas o patrocinadas por otras organizaciones.

Junto con a la preparación del HCM se elaboran programas informáticos que realizan automáticamente los procedimientos que se van plasmando en el HCM. Estos programas proceden de distintas fuentes, pero los más populares son los llamados HCS (Highway Capacity Software) que difunde el Centro McTrans de la Universidad de Florida en Estados Unidos.

Los programas HCS replican fielmente los procedimientos del HCM en el computador y resuelven los problemas en una pequeña fracción del tiempo que requiere su solución manual utilizando los formatos y las tablas del HCM. Otra manera más precisa de estimar la capacidad vial y el nivel de servicio son los modelos de simulación microscópicos. Algunos de estos modelos se han empleado para generar tablas para el HCM; sin embargo, tanto los programas HCS como esos modelos representan una manera mecánica de resolver problemas, que no permite a quien los use comprender bien lo que está

haciendo, como se observa en otra parte del Manual, relacionada con el uso de modelos y software especializados.

El HCM es un documento que contiene una serie de procedimientos basados en modelos analíticos calibrados con datos empíricos tomados en Estados Unidos y Canadá. En su conformación han participado personas de varios países y se han tenido en cuenta métodos usados fuera de su país de origen; no obstante, debido a su naturaleza empírica, la aplicación del HCM fuera de su ámbito de origen puede dar resultados imprecisos y hasta erróneos, si no se calibra para el medio en que se vaya a usar.

La versión (2000), como todas las demás, sigue la filosofía original de Normann. Ante el problema de definir analíticamente el complejo fenómeno del tránsito vial, Normann optó por definir primero las condiciones más ideales que fuera posible o más bien, según la versión 2000, denominadas básicas (carriles de 3.6 m, rasante horizontal, alineamiento recto, ausencia de vehículos pesados, aplicando a ellas factores de corrección o ajuste que representaran cuánto se apartan las condiciones reales de las básicas. La pauta para definir las condiciones básicas fue el punto a partir del cual una mejora de cualquier naturaleza de esas condiciones no se refleja en el aumento de la capacidad ni en la elevación del nivel de servicio.

La capacidad en condiciones básicas se estima basándose en los volúmenes más altos observados en vías consideradas básicas (ideales) en su clase y eligiendo no el más elevado de todos, sino uno que parezca “razonable” según el criterio de los expertos. Al principio muchas de esas capacidades eran muy fáciles de recordar: 2.000 veh/h para un carril de autopista y para

toda la calzada de una carretera de dos carriles. En los accesos a intersecciones básicas controladas por semáforo se suponía un flujo de saturación de 1.500 veh/h de verde. Desde 1950 hasta hoy se ha ido incrementando el valor de esos volúmenes, alegándose como razón que los conductores son cada vez más experimentados. Hoy en día, por ejemplo, el flujo de saturación básica en accesos a intersecciones controladas por semáforo se encuentra en 1.900 autos/h.

En el HCM de 1965 se establecieron seis niveles de servicio para los distintos tipos de vías: A, B, C, D, E y F. En efecto, el HCM estima la capacidad y el nivel de servicio para un punto o tramo uniforme de un carril o calzada durante 15 minutos, y no interviene en lo que sucede cuando hay un colapso de la circulación en vías de circulación “continua”, que provoca perturbaciones que se prolongan durante horas o cuando ocurren los catastróficos reboses de cola en vías de circulación discontinua.

En vías de circulación continua el nivel de servicio A cae normalmente dentro del régimen de flujo libre, cuando la interacción vehicular no afecta significativamente la velocidad de los vehículos; el nivel F representa condiciones de flujo forzado. Esta situación se produce cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, y la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestables. B, C, D y E son niveles intermedios ubicados en los regímenes de flujo libre o flujo restringido.

En vías de circulación discontinua no hay una correspondencia tan exacta entre los niveles de servicio y los regímenes de circula-

ción, pues los vínculos entre la capacidad y el nivel de servicio no son tan estrechos. Ambos tipos de vía se suelen diseñar para los niveles de servicio C o D.

El nivel de servicio se define por el valor de uno o más parámetros, que varían de acuerdo con el tipo de vía. La Tabla 2.1 muestra los distintos parámetros que usa la versión del HCM de 2000 para determinar los niveles de servicio.

2.1.1 Niveles de aplicación

El procedimiento básico del manual de capacidad estadounidense suele contemplar tres niveles de aplicación:

- ♦ **Análisis de circulación.** Es la aplicación que requiere mayor precisión y se basa en datos actuales sobre tránsito, vía y regulación. Si interesara conocer el nivel de una vía o parte de ella en condiciones presentes, lo mejor sería medir el parámetro correspondiente en el terreno y olvidarse de las relaciones que ofrece el manual, pero a veces se usa el manual para extrapolar valores del parámetro que se han medido solamente en una parte de la vía, cuando interesa conocerlos para toda la vía. La aplicación más útil del análisis de circulación es, sin embargo, cuando se quiere evaluar el efecto de una medida de corto alcance, como el cambio de la programación de un semáforo, la adición de un ramal de giro a derecha o el aumento del radio de una curva en una carretera rural. También se puede medir una variable a lo largo de una vía con un vehículo en movimiento, como la velocidad a flujo libre, y utilizar el manual para inferir el nivel de servicio a partir de esa información y de otros datos aislados que se tengan.

Tipo de estructura	Parámetro
Autopistas	
Secciones básicas	Densidad y velocidad
Tramos de entrecruzamiento	Densidad y velocidad
Rampas de convergencia y divergencia	Densidad
Carreteras de múltiples carriles	Densidad y velocidad
Carreteras de dos carriles	Velocidad
Intersecciones con semáforo	Demora
Intersecciones de prioridad	Demora
Arterias	Velocidad
Peatones	Espacio, eventos y demoras
Bicicletas	Eventos y demoras

Tabla 2.1

Parámetros que determinan los niveles de servicio en el HCM-2000

Fuente:

Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

- ♦ **Diseño o proyecto.** Cuando se diseña una vía o elementos permanentes de ella que requieran grandes inversiones, se debe garantizar que su utilidad será duradera. Es preciso predecir cuál va a ser la demanda de tránsito en el año para el que se proyecta a fin de satisfacerla razonablemente. El Manual puede determinar directamente algunos elementos de diseño, como el número de carriles necesarios; en otros casos, estimar el nivel de servicio que brindaría el diseño propuesto, cuando se alcance su capacidad, y sugerir los cambios que deben hacerse al diseño para lograr los objetivos propuestos. La precisión de esta aplicación es intermedia debido a la incertidumbre que existe en la predicción de la demanda de tránsito.
- ♦ **Planeación.** Esta aplicación se hace generalmente cuando se empieza a planear una vía o un sistema vial y no se conocen con exactitud los detalles necesarios. Por ejemplo, es posible que de la demanda de tránsito sólo se conozcan valores estimados del tránsito promedio diario. Por eso

es la aplicación menos precisa. El manual estadounidense proporciona procedimientos de planeación menos complicados que los aplicados en el diseño o análisis de circulación, para evitar el uso de refinamientos innecesarios en trabajos de planeamiento preliminar.

Los estudios de capacidad se hacen durante períodos de 15 minutos y se suele escoger el cuarto de hora de mayor demanda dentro de la hora pico para estudiar las condiciones peores. El procedimiento del HCM supone que sólo se conoce el volumen de demanda en la hora pico, pero no sus variaciones en esa hora, y que es posible estimar el factor de pico horario, FHP, conociendo las características de la vía que se estudia. Entonces, dividiendo el volumen para toda la hora entre el factor de pico horario se estima el volumen (en veh/h) para el cuarto de hora de mayor demanda. Sin embargo, si se conoce la demanda en períodos de al menos 15 minutos, es más preciso utilizar el mayor de ellos para hacer el análisis y olvidarse del factor de hora pico.

2.1.2 Estructura del HCM 2000

El *Manual de Capacidad 2000* representa una significativa revisión y expansión del material provisto en anteriores ediciones. El Manual ha aumentado del capítulo 14 al 31, dividido en cinco partes, a saber:

- I Visión general
- II Conceptos
- III Metodologías
- IV Corredor y análisis del área de influencia
- V Simulación y otros modelos

La parte I y la III contienen información que corresponde a los contenidos de

las ediciones previas. La parte II provee conceptos y valores estimados para implementarlos en niveles de planeación para trabajos de análisis. La parte IV presenta técnicas de cálculo y delineamientos para el análisis general de corredores y su área de influencia. La parte V presenta información de la gran variedad de modelos apropiados para macroanálisis o análisis más complejos.

Esta versión se acompaña de un disco compacto en el que se incluyen tutoriales y videoclips para encaminar la comprensión de los conceptos a los usuarios menos experimentados.

En la Tabla 2.1 se presenta la composición básica de la edición 2000.

2.2 DEFINICIONES

2.2.1 Capacidad

Hasta ahora se ha hablado del volumen máximo posible, es decir, el mayor número posible de vehículos que puede pasar por un punto de una calzada, carril o carriles, en ciertas condiciones y en un momento dado. Su valor es muy variable, pues numerosos factores que inciden en él pueden cambiar inesperadamente. Este volumen, aunque es apropiado para hacer análisis de circulación, no se presta muy bien para el diseño de vías, debido a su extrema variabilidad. Para el diseño se ha creado el concepto de capacidad vial, empleado también en el análisis de circulación y en la planeación. Su definición más empleada en la actualidad, que aparece en el *Manual de capacidad para carreteras, HCM-2000*, (Transportation Research Board, 2000, p. 5-2), es como sigue:

“Capacidad es el máximo número de peatones o vehículos que de manera razonable se pueda esperar pasen por un punto o tramo

uniforme de un carril o calzada durante un período de tiempo dado, en condiciones imperantes o prevalecientes de vía, tránsito y control”.

La capacidad se puede referir no solamente a vehículos, sino también a usuarios, bien sean peatones, pasajeros o conductores. No es un valor instantáneo e inesperado, sino el volumen máximo promedio esperado durante un período de 15 minutos generalmente. Tampoco es el volumen máximo posible en condiciones dadas, sino el que corresponde a las condiciones imperantes, que suelen ser las normales.

Debido a las peculiaridades de su definición, especialmente en vías de circulación continua, es posible que ocurra congestión cuando la demanda de tránsito es inferior a la capacidad. Así sucede cuando el volumen máximo posible sea menor que la demanda durante dos o tres minutos (por aumento súbito de la demanda o disminución repentina del volumen máximo posible) a pesar de que el volumen medio durante quince minutos no llegue al valor medio que representa la capacidad.

2.2.2 Niveles de servicio

Aunque haya capacidad de sobra para que no ocurra congestión, una vía tortuosa con tránsito intenso, de calzada estrecha y pavimento en mal estado no brinda la misma calidad de servicio que una vía con tránsito escaso, trazado suave, calzada ancha y pavimento en buen estado. Por tanto, algunos años después de que se estableció el concepto de capacidad vial, se fue elaborando el concepto de nivel de servicio, que hoy sigue definido (Transportation Research Board, 2000, p. 5-8) como: “Medida cualitativa que describe las condiciones de circulación de una corriente vehicular, caracterizada gene-

ralmente por ciertos parámetros como velocidad y tiempo de recorrido, libertad para maniobrar, interrupciones de la circulación, comodidad y seguridad”.

Capítulo	Tema
Parte I: Visión general	
1	Introducción
2	Conceptos de capacidad y niveles de servicio
3	Aplicaciones
4	Toma de decisiones
5	Glosario
6	Símbolos
Parte II: Conceptos	
7	Parámetros del flujo de tránsito
8	Características del tránsito
9	Procedimiento de análisis
10	Conceptos en vías urbanas
11	Conceptos de peatones y bicicletas
12	Conceptos de grandes vías
13	Conceptos de autopistas
14	Conceptos de transporte público
Parte III: Metodologías	
15	Vías urbanas
16	Intersecciones con semáforo
17	Intersecciones de prioridad
18	Peatones
19	Bicicletas
20	Vías de dos carriles
21	Vías multicarriles
22	Estructuras en autopistas
23	Secciones básicas de autopistas
24	Entrecruzamientos en autopistas
25	Rampas y unión en rampas
26	Entrecruzamientos
27	Transporte público
Parte IV: Corredor y área de influencia	
28	Valoración de múltiples ayudas
29	Análisis de corredores
30	Análisis del área de influencia
Parte V: Simulación y otros modelos	
31	Simulación y otros modelos

Tabla 2.2
Organización
del HCM 2000

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras (HCM
2000)

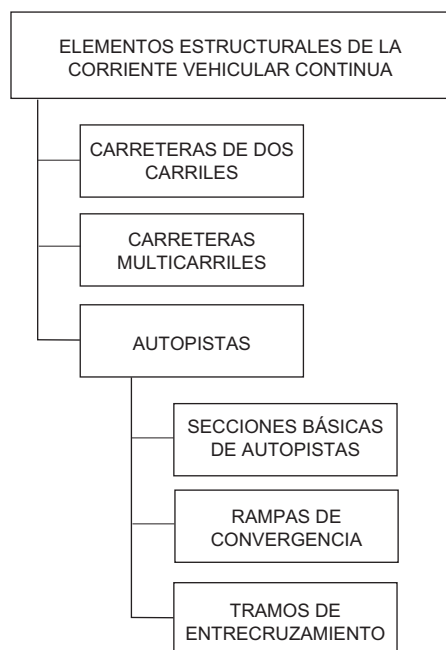
Aunque el nivel de servicio es una medida cualitativa, se define por medio de un parámetro numérico, como la velocidad media o la densidad, y a veces por más de un parámetro. En el nivel de servicio influye la intensidad de la interacción vehicular, las condiciones de la vía y su entorno, y la calidad de la regulación y señalización vial.

2.3 CORRIENTES VEHICULARES CONTINUAS

Para comprender mejor el desarrollo de este numeral, se presenta a continuación el esquema que relaciona los principales elementos estructurales correspondientes a una corriente vehicular continua, a los cuales se realizará el tratamiento de la capacidad y el nivel de servicio.

Inicialmente se presenta la metodología que la experiencia colombiana expone para el análisis de la capacidad y el nivel de servicio para carreteras o vías de dos carriles.

Figura 2.1
Principales
elementos de
la estructura
vial en
corrientes
continuas



Fuente:
elaboración
propia.

2.3.1 Vías de dos carriles

Tradicionalmente se había venido usando en Colombia el HCM, sucesivamente en sus versiones de 1950, 1965 y 1985, para estimar la capacidad y el nivel de servicio en las carreteras colombianas de dos carriles. Sin embargo, para 1986 se llegó al convencimiento de que los resultados que daba el HCM no correspondían a la realidad colombiana. Las razones principales de esta discrepancia fueron:

- Los vehículos en Colombia son mucho menos potentes que en Estados Unidos.
- En Colombia se conduce en forma más temeraria.
- La calidad del servicio que proporciona una vía rural en Colombia depende más de las condiciones físicas de la vía que de la interacción vehicular, mientras que en Estados Unidos ocurre lo contrario.

En consecuencia, la Universidad del Cauca en Popayán emprendió un estudio para calibrar el Capítulo 8 del HCM de 1985, dedicado a las carreteras de dos carriles. Este estudio, que corresponde a una tesis de maestría, contó con el decidido apoyo del Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Colombia (Guardela, Moreno y Nieves, 1987).

En el estudio se tomaron cuantiosos datos de campo que sirvieron para establecer relaciones entre distintas variables del tránsito, complementados por conocimientos racionales. Se hizo una calibración preliminar del HCM para Colombia, pero el estudio reveló que no bastaba hacer calibraciones, sino que había que crear un manual de capacidad y nivel de servicio para carreteras de dos carriles dirigido específicamente a las condiciones del país. Este *Manual colombiano* fue creado por dos nuevos estudios, correspon-

dientes a sendas tesis de maestría (Cerquera y López, 1990), que emplearon los resultados del primer estudio y contaron con el apoyo del Ministerio de Transporte de la época o MOPT. El nuevo manual, si bien empleaba la forma de proceder y todos los elementos utilizables del HCM, se fundó en datos colombianos y en nuevas variables y modelos analíticos que contribuyeron a reflejar mejor la realidad colombiana. Fue publicado en 1992 (Ministerio de Obras Públicas y Transporte).

El *Manual colombiano* había sido implementado y verificado en 35 tramos de carretera en distintas partes de Colombia, comparando sus resultados con valores equivalentes observados en la realidad; y lo mismo se había hecho con el procedimiento del HCM. Los resultados del *Manual colombiano* se acercaron muchísimo más a la realidad colombiana que los del HCM, pero algunos aspectos del primero eran deficientes por carencia de datos de campo, falta de tiempo y recursos para realizar análisis concienzudos.

La Universidad del Cauca continuó haciendo investigaciones sobre el tema, y pronto se fueron agregando a ella la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, la Universidad Militar Nueva Granada, la Universidad del Quindío y la Universidad Javeriana, en un esfuerzo investigativo colectivo coordinado por la primera. Al nacer el Instituto Nacional de Vías (Invías) en 1994, éste reconoció el gran valor del trabajo que se estaba realizando y lo patrocinó y apoyó. Esto dio un gran impulso a las labores investigativas. También el Invías aplicó los resultados de esas labores a la red nacional de carreteras. Finalmente, en noviembre de 1996, el Invías y la Universidad del Cauca publicaron una segunda versión mejorada del

Manual colombiano (Instituto Nacional de Vías y Universidad del Cauca). Ahora Colombia es uno de los pocos países del mundo que cuenta con un manual propio sobre capacidad y nivel de servicio para carreteras de dos carriles.

Las vías de dos carriles no se encuentran con frecuencia en el medio urbano, pero constituyen el tipo de carreteras que más abunda en todos los países, aunque los volúmenes de tránsito que conducen son mucho más bajos que los que circulan en autopistas y carreteras multicarriles. Constan de una calzada con dos carriles, uno para cada sentido de circulación. Generalmente tienen bermas a cada lado, con calidades muy variables.

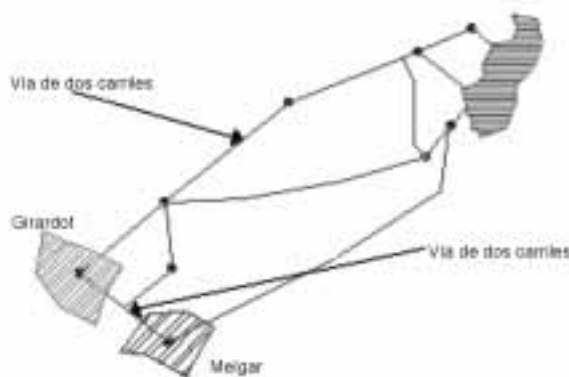
Las maniobras de paso a vehículos lentos requieren uso del carril contrario, teniendo en cuenta la distancia de visibilidad y el espaciamiento permitido por la corriente del tráfico en el sentido contrario. Con el aumento de los volúmenes de tránsito y de las restricciones geométricas, la posibilidad de realizar maniobras de adelantamiento disminuye lo cual es causa de la formación de pelotones. Los conductores que van dentro de los pelotones están sujetos al retraso, porque no pueden realizar maniobras de adelantamiento.

Debido al rebase de vehículos por el carril de sentido contrario, la capacidad y el nivel de servicio en un sentido influyen poderosamente en el de sentido contrario, al punto que en el HCM se calculan estas características para los dos sentidos combinados. No obstante, muchos piensan que el análisis debe hacerse por separado para cada sentido.

En este tipo de vías, las brechas requeridas para adelantar son cuatro o cinco veces mayores que las que se necesitan en las otras vías de circulación continua.

El funcionamiento del tráfico en vías de dos carriles, con respecto a vías multicarriles,

Figura 2.2
Vía de dos
carriles.
Esquema



Fuente:
elaboración
propia. Esquema
Vía
Bogotá-Girardot

carriles difiere en el flujo ininterrumpido. La demanda de paso aumenta rápidamente cuando los volúmenes de tráfico aumentan; la capacidad de paso en el carril contrario disminuye de la misma forma como aumentan los volúmenes.

Por consiguiente, en las vías de dos carriles no se presenta el flujo sin interrupciones. En ellas el flujo de tráfico normal en una dirección influye en el flujo de la otra dirección. Los conductores deben ajustar su velocidad de viaje de acuerdo con los aumentos de volumen y la disminución de la habilidad de maniobras de adelantamiento.

La movilidad eficaz es la función principal de las carreteras de dos carriles, que conectan mayores generadores de tráfico o sirven a las vías primarias y las redes viales nacionales.

Otras vías de dos carriles pavimentadas sirven para la accesibilidad a un área, a menudo para volúmenes de tráfico relativamente bajos. El acceso rentable es la consideración dominante.

Una carretera que se desea segura es contraria a las grandes velocidades que se esperan. Por estas razones, hay dos actuaciones que permiten medir y describir el nivel del servicio para las vías de dos carriles, según el manual norteamericano: el porcentaje de

tiempo gastado en adelantamiento y la velocidad media de viaje.

El porcentaje de tiempo gastado en adelantamiento representa la libertad para maniobrar y el confort y conveniencia del viaje; es el porcentaje de tiempo medio de viaje que los vehículos deben llevar en los pelotones, detrás de los vehículos más lentos debido a la incapacidad de realizar maniobras de adelantamiento. El porcentaje de tiempo gastado en adelantamiento es difícil de medir en el campo. Sin embargo, el porcentaje de vehículos que viajan con distancias menores a los 3 segundos es una situación representativa que puede usarse como una medida sustituta.

La velocidad media de viaje refleja la movilidad en una vía de dos carriles, esto es, la longitud del segmento de la carretera dividida por el tiempo medio de viaje de vehículos que circulan por el segmento en ambas direcciones durante determinado intervalo.

2.3.1.1 Metodología

El procedimiento, que sigue la filosofía del HCM, empieza por establecer la capacidad para condiciones básicas o ideales y luego la afecta con factores menores que la unidad para reducir su magnitud en razón a las condiciones reales que se presentan. Los requisitos que definen las condiciones básicas o ideales son:

- ◆ Repartición del tránsito por igual en ambos sentidos.
- ◆ Terreno plano y rasante horizontal.
- ◆ Carriles de no menos de 3.65 m de ancho.
- ◆ Bermas de no menos de 1.80 m de ancho.
- ◆ Ausencia de vehículos pesados.

- ◆ Superficie de rodadura en condiciones óptimas.
- ◆ Alineamiento recto.

Los primeros cinco requisitos son similares a los del HCM; los dos últimos son de origen colombiano.

Como parámetro principal para definir el nivel de servicio se adoptó la velocidad media de recorrido, en vez del porcentaje de tiempo demorado, que se usa parcialmente en el HCM, porque se estimó que ese parámetro reflejaba mejor las condiciones físicas de las vías en Colombia, que inciden grandemente en la calidad del servicio que prestan. También se optó por separar el cálculo de la capacidad del de nivel de servicio porque la relación entre los dos valores depende del conocimiento que se tenga de la relación entre el volumen y la velocidad, que siempre es deficiente. No pareció correcto aplicar los mismos factores de corrección a los dos indicadores porque su efecto es distinto. Por ejemplo, una circunstancia que haga reducir la velocidad en un 25% no reducirá la capacidad en la misma proporción. Capacidad es volumen, que es el inverso del intervalo. Este último se compone de paso (que se reduce en la misma proporción en que aumenta la velocidad) y de brecha (que no cambia mucho). Si la velocidad a capacidad es 40 km/h y el paso es la tercera parte de la brecha, teóricamente, una reducción en velocidad que haga incrementar el paso en un 25% aumentará el intervalo (y disminuirá la capacidad) en sólo $25/3 = 8.3\%$.

Como parámetro secundario se escogió la utilización de la capacidad para vigilar lo cercano que se esté del volumen máximo posible y la congestión. Sin embargo, en Colombia es difícil encontrar carreteras de dos carriles que se congestionen.

Determinación de la capacidad

Por medio de observaciones en el terreno se determinó que, en Colombia, la capacidad de una carretera de dos carriles, en condiciones ideales, sería 3.200 automóviles por hora en ambos sentidos. A este valor se le aplican los siguientes factores de corrección relativos a:

- ◆ Pendiente (obtenido de datos colombianos).
- ◆ Distribución del volumen por sentidos (tomado de una tesis colombiana).
- ◆ Ancho de carril y berma (tomado del manual norteamericano).
- ◆ Efecto de los vehículos pesados (obtenido de un modelo analítico original).

La capacidad ideal multiplicada por esos factores produce la capacidad para las condiciones estudiadas en vehículos mixtos por hora sin tener en cuenta las variaciones aleatorias que pueda haber en la demanda de tránsito o en volumen máximo posible durante la hora pico. Para compensar algo el efecto de esas posibles variaciones se multiplica el valor obtenido de la capacidad por un factor de hora pico basado en períodos de 5 minutos, es decir, se disminuye el valor de la capacidad para simular el efecto del pico de la variación en el período de 5 minutos más crítico.

Determinación del nivel de servicio

Para determinar el nivel de servicio es preciso estimar el valor del parámetro que lo define: la velocidad media de recorrido. Se procede de manera análoga al cálculo de la capacidad, de lo ideal o básico a lo existente o real, aplicando al primero factores de la misma naturaleza que los usados para la capacidad, y tres factores adicionales. Los factores

tienen valores menores que los de capacidad (es decir, tienen mayor efecto reductor) porque, como se ha visto, la velocidad es más sensible a ellos que la capacidad. Entre los factores adicionales se encuentra el que corresponde a la utilización de la capacidad, y para conocer esa utilización, naturalmente, hay que saber cuál es el volumen de demanda y cuál es la capacidad. Ésa es una razón más para calcular primero la capacidad.

El factor se derivó de una relación entre el volumen y la velocidad obtenida de observaciones en carreteras colombianas. Los otros factores efecto de la superficie de rodadura y curvatura, que no tiene en cuenta el HCM, fueron productos de investigaciones realizadas en Colombia.

Los pasos seguidos en el procedimiento se presentan en la Tabla 2.3.

Paso 1. Se parte de la velocidad a flujo libre de automóviles en condiciones ideales (excepto que la rasante no tiene que ser horizontal) para un promedio de pendientes ascendentes de cierta longitud total. Esta velocidad se obtiene de una tabla preparada con datos observados en pendientes de 0 a 12%. [El HCM sólo llega al 7%].

Paso 2. La velocidad anterior se multiplica por el factor de utilización de la capacidad para transformarla en velocidad a flujo restringido de automóviles en condiciones ideales.

Paso 3. La velocidad anterior se multiplica por factores relativos al ancho de carril y

berma y al estado de la superficie de rodadura para convertirla en velocidad a flujo restringido de automóviles en condiciones estudiadas.

Paso 4. La velocidad anterior se multiplica por el factor del efecto de vehículos pesados para obtener la velocidad a flujo restringido del tránsito mixto en condiciones estudiadas

Se supone que estas velocidades son tangenciales.

Paso 5. Esa velocidad determinará el nivel de servicio si es inferior a la máxima que permite la curva más cerrada. En caso contrario, la máxima permitida por la curvatura será la determinante.

Una vez estimada la velocidad media de recorrido, se determina el nivel de servicio de la Tabla 2.4. La razón de tener distintos límites para el parámetro que determina el nivel de servicio (la velocidad media de recorrido) es la suposición que la tolerancia de los usuarios varía con el tipo de terreno. Por ejemplo, una velocidad determinada, digamos 40 km/h, puede considerarse terriblemente lenta en terreno llano, pero excelente en terreno escarpado. En el primer caso sería Nivel A; en el segundo Nivel F.

Ya que en las carreteras colombianas de dos carriles las condiciones de la vía inciden mucho en el nivel de servicio, éste no está estrechamente relacionado con el régimen de circulación. Así el Nivel A no significa nece-

Tabla 2.3 Cálculo de la velocidad que determina el nivel de servicio en el manual colombiano

Fuente: Manual de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles, Mintransportes, Unicauca e Inviás

Pasos	Factores aplicados	Características de los resultados obtenidos			
		Condiciones	Vehículos	Flujo	Consideración de la curvatura
1	Ninguno	Ideales	Automóviles	Libre	No
2	Utilización de la capacidad	Ideales	Automóviles	Restringido	No
3	Ancho de carril y berma superficie de rodadura	Estudiadas	Automóviles	Restringido	No
4	Vehículos pesados	Estudiadas	Todos	Restringido	No
5	Ninguno	Estudiadas	Todos	Restringido	Sí

Tipo de terreno (Pendiente longitudinal)	Niveles de servicio					
	A	B	C	D	E	F
Plano < 3%	>83	72-83	62-72	52-62	42-52	≤42
Ondulado ≥ 3 - 6%	>68	59-68	51-59	43-51	34-43	≤34
Montañoso ≥ 6 - 8%	>52	45-52	39-45	33-39	26-33	≤26
Escarpado ≥ 8%	>36	31-36	27-31	23-27	18-23	≤18

Tabla 2.4

Velocidad en km/h que determinan los niveles de servicio por tipo de terreno

Fuente: *Manual de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles*, Mintransporte, Unicauca e Invias

sariamente régimen a flujo libre ni el F flujo congestionado.

2.3.2 Vías multicarriles

2.3.2.1 Características físicas y funcionales

Las carreteras de carriles múltiples o multicarriles son vías de circulación continua para tránsito de paso, con limitación parcial de acceso y no total como las autopistas. Difieren también de las autopistas en que pueden carecer de separador central y hasta tener uno que otro semáforo que obliga a detener el tránsito que circula por ellas.

De acuerdo con el HCM (Transportation Research Board, 2000, p. 12-1), las vías multicarriles han mantenido características de velocidades entre los 60 y 90 km/h; los semáforos deben estar espaciados a más de tres kilómetros aproximadamente; si no, serían arterias urbanas. El HCM también dice que estas vías tienen normalmente cuatro o seis carriles y que su tránsito promedio diario anual (TPDA) suele estar entre 15.000 y 40.000 veh/día. Además, las vías multicarriles en el ámbito estadounidense suelen tener límites de velocidad con respecto a los límites de velocidad de las calles urbanas superiores en 10 o 20 km/h.

Aunque estas vías no son tan eficientes como las autopistas, representan un avance sobre las carreteras de dos carriles no sola-

mente porque ofrecen más carriles al tránsito, sino también porque los adelantamientos son más fáciles en ellas porque requieren brechas mucho menores y no están limitados por distancias visibles (hacia adelante) muy cortas.

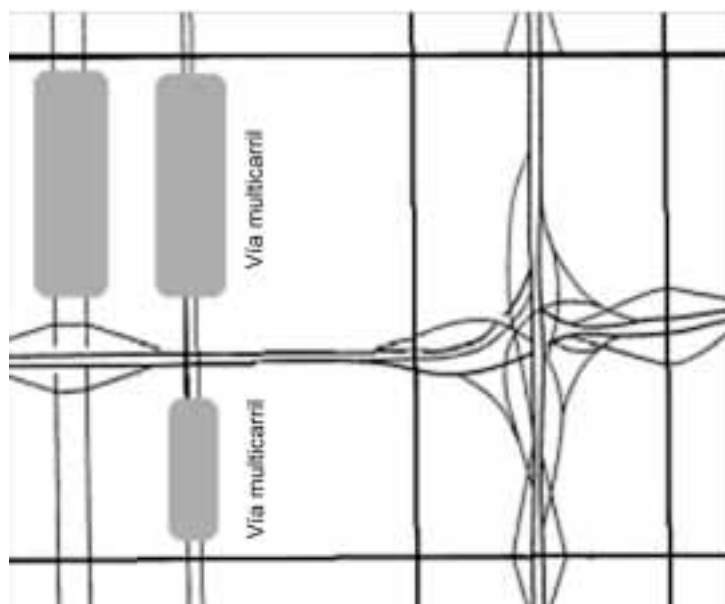
Las vías multicarriles en los entornos suburbano y rural tienen diferentes características operacionales que las autopistas, arterias urbanas y vías de dos carriles. El más notable es no restringir completamente el acceso hacia y desde las propiedades adyacentes; que pueden ser intersecciones de prioridad o de semáforos ocasionales.

La fricción causada por la corriente del tráfico que se opone a los vehículos en las carreteras no divididas y el acceso a vías contribuye a una escena operacional diferente de éstas. Las vías multicarriles varían entre el flujo no interrumpido de autopistas y las condiciones de flujo interrumpido por dispositivos de control que se presentan en las calles urbanas.

La capacidad de una vía multicarril es la máxima proporción del flujo horario en que los vehículos se desplazan razonablemente en un segmento uniforme bajo el predominio de las condiciones de la vía y del tráfico.

La vía multicarril se encuentra localizada entre intersecciones de prioridad o controladas con semáforo en distancias de hasta 3 kilómetros. En la Figura 2.3 se ilustran esquemáticamente dos vías multicarriles.

Figura 2.3
Vía de
múltiples
carriles



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras.
(HCM 2000)

Las vías multicarril difieren sustancialmente de las carreteras de dos carriles, principalmente porque en una vía multicarril el conductor puede sobrepasar a los vehículos que llevan menor velocidad sin usar los carriles designados para el tráfico de sentido contrario. Las vías multicarriles también tienden a localizarse cerca de las áreas urbanas y a menudo conectan las áreas urbanas. Estas vías tienen características de diseño mejores que las de dos carriles, incluida la curvatura horizontal y vertical.

Ciertas características distinguen una vía multicarril suburbana de vías rurales. Los vehículos pueden entrar o pueden dejar las vías multicarriles a las intersecciones y entradas de autos, y ellos pueden encontrarse con semáforos.

Las normas para el diseño de las vías multicarriles tienden a ser más bajas que las normas para autopistas. Aunque una vía multicarril se acerca a las condiciones de la autopista, esta última tiene en sus puntos de acceso y volúmenes de giro valores muy bajos, cercanos a cero. La escena visual y el terreno desarrollado a lo largo de las carreteras multicarril tienen un impacto mayor en los conductores que a lo largo de las autopistas.

La vía multicarril es similar a las calles urbanas en muchos aspectos, aunque le falta la regularidad de semáforos y tiende a tener mayor control en el número de puntos de acceso por kilómetro. Sus normas tienen especificaciones, generalmente más altas que las registradas para las vías urbanas.

2.3.2.2 Condiciones básicas para el análisis

Estas condiciones aparecen en la versión de 2000 del HCM (Transportation Research Board, 2000, p. 21-1 a 21-31). Se aplica sólo a segmentos de vías de flujo no interrumpido donde la circulación es continua y donde puede haber entradas de vehículos desde calles transversales o propiedades, pero donde no hay estacionamientos, paraderos de buses, ni peatones.

El procedimiento considera los atributos fijos de la vía, el tránsito y el control que se reflejan en la velocidad a flujo libre. Estos pueden ser pendientes, curvatura, ancho de carril, presencia o ausencia de separador central, velocidad máxima permitida, características de los conductores y vehículos, buen estado del tiempo, buena visibilidad y ausencia de accidentes. En condiciones ideales, se supone que esta velocidad debe ser igual o mayor de 100

km/h. Los requisitos que establecen estas condiciones son:

- ♦ Ancho mínimo de carril = 3.6 metros.
- ♦ Mínima distancia libre lateral total en la dirección de viaje, como representación de las distancias totales laterales desde el borde de los carriles a las obstrucciones a lo largo del borde del camino (lateral derecha) y en el separador (lateral izquierda), deberán sumar hasta 3.6 m. (la distancia libre lateral mayor que 1.8 m en cada uno de los bordes se considera en los cálculos igual a 1.8 m).
- ♦ Corriente del tráfico compuesta exclusivamente por vehículos de pasajeros.
- ♦ Espaciamiento entre intercambiadores cada 3 km o más.
- ♦ No contar con accesos directos a lo largo del segmento analizado.
- ♦ Vía multicarril dividida.
- ♦ Velocidad a flujo libre (VFL) superior a 100 km/h.

Así mismo, se establecen limitaciones para la aplicación de esta metodología, las cuales se plantean a continuación.

- ♦ Obstáculos transitorios causados por construcción, accidentes, o cruces con ferrocarriles.
- ♦ Interferencia causada por maniobras de parqueo o estacionamiento en las bermas (como en la vecindad de una tienda rural, mercado o atracción turística).
- ♦ Sección transversal de tres carriles.
- ♦ El efecto de eliminación o adición de carriles al inicio o terminación del segmento analizado.
- ♦ Posibles colas y demoras en las transiciones de un segmento de la vía multicarril con una vía de dos carriles.
- ♦ Diferencias entre los separadores y los carriles de giro a la izquierda.

- ♦ Velocidad a flujo libre por debajo de los 70 km/h o superior a los 100 km/h.

2.3.2.3 Metodología

La entrada y el orden del método de cálculo para las vías multicarriles se realizan como se esquematiza en la Figura 2.4.

Niveles de servicio

Aunque la velocidad es una preocupación mayor de los conductores, la libertad para maniobrar en la corriente de tráfico y la proximidad a otros vehículos también es importante. El criterio de los niveles de servicio está basado en las curvas mostradas de velocidad-flujo típico y relaciones de densidad-flujo que corresponde a un valor constante de densidad.

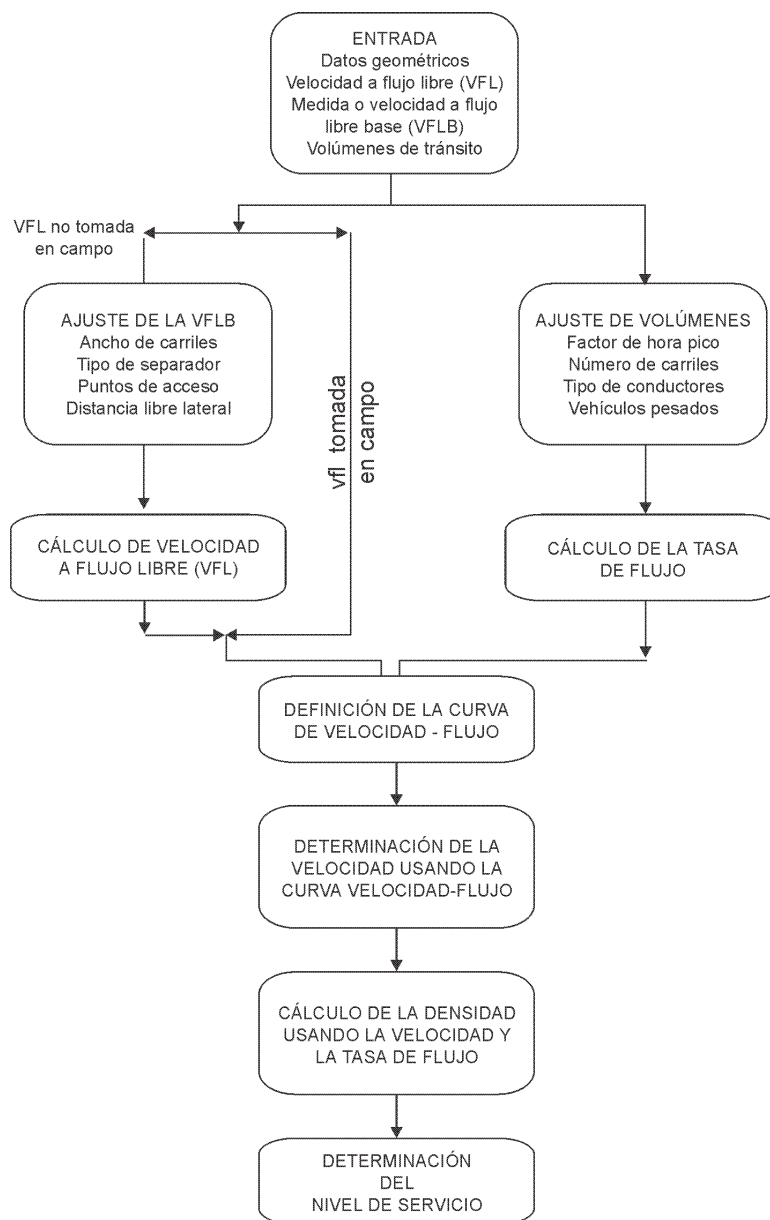
Nivel de servicio A

Describe el funcionamiento a flujo libre. La operación de los vehículos no se encuentra perturbada por la presencia de otros vehículos ni las operaciones se encuentran restringidas por las condiciones geométricas. La maniobrabilidad con el tráfico es buena. Los efectos de incidentes menores o averías en un punto son fácilmente absorbidas en este nivel sin cambiar la velocidad de viaje.

Nivel de servicio B

Este nivel de servicio indica el flujo libre, aunque se vuelve notable la presencia de otros vehículos. Las velocidades medias de viaje son iguales a las del nivel de servicio A, pero los conductores tienen menos libertad para maniobrar. Todavía se absorben fácilmente los incidentes menores locales en un

Figura 2.4
Esquema
metodológico
para
el análisis
de vías
multicarriles



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

punto; el deterioro en el nivel de servicio es más obvio.

Nivel de servicio C

El nivel de servicio C marca la influencia de densidad de tráfico en el funcionamiento. La habilidad de maniobrar dentro de la corriente de tráfico está claramente afectada

por la presencia de otros vehículos. En las vías multicarriles con una velocidad a flujo libre, VFL, sobre los 80 km/h, las velocidades de viaje se reducen un poco. Los incidentes menores pueden causar un deterioro local serio en el servicio, y se pueden formar colas detrás de cualquier ruptura de tráfico significativa.

Nivel de servicio D

En el nivel de servicio D, la habilidad de maniobrar se restringe severamente por la congestión de tráfico. La velocidad de viaje está reducida por el aumento del volumen creciente. Sólo pueden absorberse rupturas menores sin que se formen colas extensas; el servicio se deteriora seriamente.

Nivel de servicio E

Este nivel de servicio representa el funcionamiento cercano de la capacidad de la vía; es un nivel inestable. Las densidades varían, mientras dependan de la velocidad a flujo libre que experimenta la corriente de tráfico. Los vehículos se encuentran operando con un mínimo espaciamiento para mantener un flujo uniforme. Los incidentes no pueden disiparse rápidamente, causando a menudo colas que llegan a deteriorar el nivel de servicio a F. Para la mayoría de vías multicarriles con velocidad a flujo libre entre 70 y 100 km/h, la velocidad media de los vehículos livianos se registran en el rango de 68 a 88 km/h, pero es muy inconstante e imprevisible.

Nivel de servicio F

Representa condiciones de flujo forzado o de ruptura. Ocurre cuando los vehículos que llegan son mayores que la proporción a que ellos se descargan o cuando la demanda de previsión excede la capacidad computada de un medio planeado. Aunque los funcionamientos en estos puntos y en las secciones inmediatas corriente arriba parecen estar a la capacidad, las colas se forman detrás de estos puntos de ruptura.

En las colas, el funcionamiento es muy inestable, con vehículos que experimentan

períodos breves de movimientos seguidos por bloqueos. Las velocidades de viaje dentro de las colas generalmente son menores a los 48 km/h.

Aunque el punto de ruptura crea la formación de colas, el funcionamiento dentro de la cola generalmente no se relaciona con las deficiencias a lo largo del segmento de la vía multicarril. En la Tabla 2.5 se presentan los criterios de los niveles de servicio para velocidades a flujo libre de 100 km/h, 90 km/h, 80 km/h y 70 km/h.

El valor superior mostrado para un nivel de servicio E (28 vehículos livianos/km/carril) es la densidad máxima a la que se espera que los flujos ocurran a capacidad.

Determinación de la velocidad a flujo libre

La velocidad a flujo libre (VFL) corresponde a la velocidad del tráfico a un volumen bajo y una baja densidad. Los conductores que viajan por la vía multicarril a velocidad de flujo libre se sienten viajando cómodos en condiciones físicas, medioambientales, y de control de tráfico sin congestionamientos en su sección. Las velocidades de flujo libre serán más bajas en las secciones de la vía multicarril con restricciones de los alineamientos verticales u horizontales. De la misma forma, la velocidad a flujo libre tiende a ser más baja cuando se anuncian límites de velocidad. La importancia de la velocidad a flujo libre es el punto de inicio para analizar capacidad y nivel de servicio para las condiciones de flujo sin interrupción. La velocidad a flujo libre, VFL, para las vías multicarriles es la velocidad media de los automóviles livianos en condiciones de flujo de tráfico de bajo a moderado.

La Figura 2.5 muestra las curvas velocidad-volumen adoptadas en este procedimiento.

Tabla 2.5
Criterios
para la
determinación
de los niveles
de servicio
en vías
multicarriles

Velocidad a flujo libre	Criterio	Nivel de servicio				
		A	B	C	D	E
100 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	25
	Velocidad media (km/h)	100	100	98.4	91.5	88
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.32	0.50	0.72	0.92	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	700	1100	1575	2015	2200
90 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	19	22	26
	Velocidad media (km/h)	90	90	89.8	84.7	80.8
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.30	0.47	0.68	0.89	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	630	990	1435	1860	2100
80 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	27
	Velocidad media (km/h)	80	80	80	77.6	74.1
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.28	0.44	0.64	0.85	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	560	880	1280	1705	2000
70 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	28
	Velocidad media (km/h)	70	70	70	69.6	67.9
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.26	0.41	0.59	0.81	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	490	770	1120	1530	1900

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

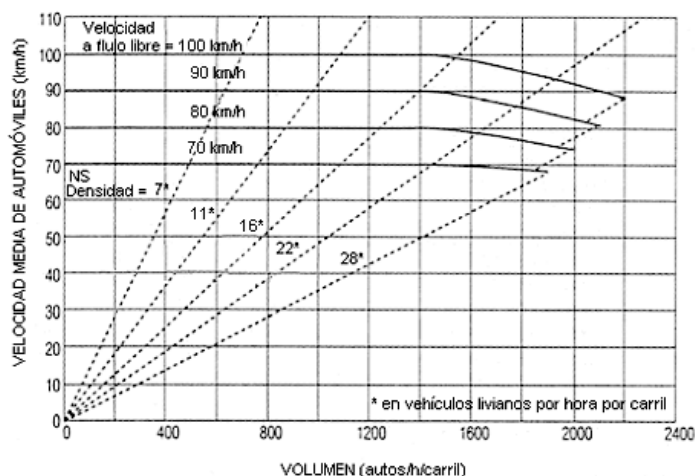
to. Son curvas paralelas que permanecen horizontales hasta un volumen de 1400 vehículos/h/carril. Después descienden muy levemente. Es decir, que las velocidades a flujo libre se mantienen hasta que se alcanza este volumen.

Las rectas inclinadas representan lugares geométricos de una misma densidad que además limita dos niveles de servicio conti-

guos. En virtud de la ecuación fundamental del tránsito (densidad = volumen/velocidad), que establece una relación lineal, como todas esas rectas pasan por el origen de coordenadas, la tangente del ángulo formado con el eje de las ordenadas representa la densidad. Al ser casi insignificantes los cambios de velocidad, el aumento de densidad es casi proporcional al aumento de volumen, circunstancia que influyó mucho para que la densidad fuera seleccionada como parámetro para determinar el nivel de servicio.

La densidad máxima para el nivel de servicio E ocurre cuando la relación v/c es igual a 1. Para los valores 25, 26, 27 y 28 veh/km/carril corresponden velocidades de 100, 90, 80 y 70 km/h, respectivamente. La capacidad varía según la velocidad a flujo libre. Capacidades de 2200, 2100, 2000 y 1900

Figura 2.5
Curvas
velocidad
media-volumen
para límites de
nivel de
servicio según
densidad.



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

veh/km/carril corresponden velocidades de 100, 90, 80 y 70 km/h, respectivamente.

Para tasas de flujo (v_p), $v_p > 1400$ y $90 < VFL < 100$, entonces

$$V = VFL - \left[\left(\frac{9.3}{25} VFL - \frac{630}{25} \right) \left(\frac{v_p - 1400}{15.7 VFL - 770} \right)^{131} \right] \quad \mathbf{2.1}$$

Para $v_p > 1400$ y $80 < VFL < 90$, entonces

$$V = VFL - \left[\left(\frac{10.4}{26} VFL - \frac{696}{26} \right) \left(\frac{v_p - 1400}{15.6 VFL - 704} \right)^{131} \right] \quad \mathbf{2.2}$$

Para $v_p > 1400$ y $70 < VFL < 80$, entonces

$$V = VFL - \left[\left(\frac{11.1}{27} VFL - \frac{728}{27} \right) \left(\frac{v_p - 1400}{15.9 VFL - 672} \right)^{131} \right] \quad \mathbf{2.3}$$

Para $v_p > 1400$ y $VFL = 70$, entonces

$$V = VFL - \left[\left(\frac{3}{28} VFL - \frac{75}{14} \right) \left(\frac{v_p - 1400}{25 VFL - 1250} \right)^{131} \right] \quad \mathbf{2.4}$$

La estimación de la velocidad a flujo libre en vías de múltiples carriles en la ciudad de Bogotá fue 74.23 ± 0.56 kilómetros por hora, o lo que es igual, de 73.67 a 74.79 kilómetros por hora, considerando un intervalo de confianza del 95%.

Hay dos maneras de determinar las velocidades a flujo libre: (a) midiéndolas en el terreno por cualquier procedimiento o (b) estimándolas por la siguiente ecuación:

$$VFL = VFLB - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A \quad \mathbf{2.5}$$

donde

VFL = velocidad a flujo libre [km/h]

$VFLB$ = Velocidad a flujo libre base, 100 km/h (rural o suburbana) [km/h]

f_{LW} = factor de ajuste por ancho de carril [km/h]

f_{LC} = Factor de ajuste por distancia libre lateral en la berma derecha [km/h]

f_M = Factor de ajuste por tipo de separador que se presenta [km/h]

f_A = Factor de ajuste por puntos de acceso [km/h]

Factor de ajuste por ancho de carril

La condición base del ancho del carril es 3.6 m. Cuando el ancho promedio de todos los carriles es menor de 3.6 m, se reduce la velocidad de flujo libre base, $VFLB$. No existen datos sobre los factores de ajuste para carriles menores de 3.0 metros; los factores de ajuste se presentan en la Tabla 2.6.

Ancho de carril (m)	Reducción en velocidad a flujo libre (km/h)
3.6	0.0
3.5	1.0
3.4	2.1
3.3	3.1
3.2	5.6
3.1	8.1
3.0	10.6

Tabla 2.6

Factor de ajuste por ancho de carril

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Factor de ajuste por distancia libre lateral

Entre las reducciones de velocidad causadas por la distancia libre lateral para las obstrucciones fijas en la orilla de la vía o en el separador se consideran las siguientes: señales, árboles, estribos de puentes, puentes de trenes, barreras del tráfico, y muros de contención; los sardineles no son considerados obstrucciones. Para las vías multicarriles, se ha definido el efecto de la distancia libre lateral total mediante la expresión

$$TLC = LC_R * LC_L \quad \mathbf{2.6}$$

donde

TLC = distancia libre lateral total [m]

LC_R = distancia libre lateral desde el borde derecho del carril de la vía

hasta la presencia de obstáculos (si es mayor de 1.80 m, utilice 1.8 m) [m]

LC_L = distancia libre lateral desde el borde izquierdo del carril de la vía hasta la presencia de obstáculos (si es mayor de 1.80 m, utilice 1.8 m). Para vías sin separador no se presenta ningún factor de ajuste para la distancia libre lateral izquierda, debido a que el ajuste se considera en el factor de ajuste por tipo de separador, así mismo cuando se presentan carriles de giro a la izquierda, se considera también un valor de 1.8 m [m]

En la Tabla 2.7, se presentan el factor de reducción en la velocidad a flujo libre de acuerdo con la distancia lateral y el número de carriles que ofrezca la vía.

Así, una distancia libre lateral total de 3.6 metros se usa para una vía completamente sin obstrucciones; sin embargo, el actual valor es usado cuando las obstrucciones se localizan cerca de la vía. El factor de ajuste de la distancia libre lateral para vías multicarriles de seis carriles es ligeramente menor que para las vías de cuatro carriles porque las obstrucciones laterales tienen un efecto mínimo en el funcionamiento del tráfico en el carril del centro de una vía de tres carriles.

Factor de ajuste por tipo de separador

Las vías multicarriles pueden o no presentar divisiones; el factor de ajuste por tipo de separador considera la fricción causada por la corriente de tráfico que se opone al movimiento en un carril adyacente. La Tabla 2.8 proporciona los ajustes para reflejar el efecto del tipo de separador.

Tabla 2.7
Factor de ajuste por distancia libre lateral

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

En vías de cuatro carriles		En vías de seis carriles	
Distancia libre lateral total (m)	Reducción de la velocidad a flujo libre (km/h)	Distancia libre lateral total ¹ (m)	Reducción de la velocidad a flujo libre (km/h)
3.6	0.0	3.6	0.0
3.0	0.6	3.0	0.6
2.4	1.5	2.4	1.5
1.8	2.1	1.8	2.1
1.2	3.0	1.2	2.7
0.6	5.8	0.6	4.5
0.0	8.7	0.0	6.3

Tabla 2.8
Factor de ajuste por tipo de separador

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Tipo de separador	Reducción de la velocidad a flujo libre (km/h)
Vías sin división	2.6
Vías con división, incluidos carriles de giro a la izquierda	0.0

Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso

El factor de ajuste para varios niveles de densidad de puntos de acceso son considerados por kilómetro. Los datos indican que para cada punto de acceso por kilómetro, las

disminuciones de la velocidad a flujo libre, VFL, estiman que se reducen en aproximadamente 4 km/h sin importar el tipo de separador. La densidad de los puntos de acceso en una vía multicarril dividida es determinada al dividir el número total de puntos de acceso (es decir, intersecciones y entradas de autos) en el lado derecho de la carretera en la dirección de viaje por la longitud total del segmento dado en kilómetros. Una intersección o entrada de autos sólo debe ser incluida si influye en el flujo de tráfico. Los puntos de acceso inadvertidos por el conductor o con poca actividad no deben ser incluidas para determinar la densidad de puntos de acceso.

Aunque los ajustes de la densidad de puntos de acceso no incluyen los datos para las carreteras multicarriles de sentido único, podría ser apropiado incluir intersecciones y entradas de autos en ambos lados de una vía de sentido único para determinar el número total de puntos de acceso por kilómetro. En la Tabla 2.9 se presentan los factores de ajuste por la densidad de puntos de acceso.

Determinación de la tasa de flujo

La proporción de flujo en cada hora deberá reflejar la influencia de vehículos pesados y la variación temporal de la variación del flujo de tráfico durante una hora, así como las características de la población de conductores o usuarios. Estos efectos se reflejan ajustando los volúmenes de cada hora que se presentan típicamente en vehículos mixtos

por hora (veh/h), para llegar así a una tasa de flujo de vehículos equivalentes en autos livianos (vehículo liviano de pasajeros/h). La tasa de flujo de vehículos livianos equivalente es el resultado de calcular el factor de equivalencia del vehículo pesado en vehículos livianos. La ecuación que se presenta a continuación se utiliza para calcular la tasa de flujo de vehículos equivalentes.

$$V_p = \frac{V}{FHP \times N \times f_{HV} \times f_p} \quad 2.7$$

donde

V_p = tasa de flujo equivalente en 15 minutos [vhp/h/carril]

V = volumen horario [vh/h/sentido]

FHP = factor de hora pico

N = número de carriles por sentido

f_{HV} = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

f_p = factor de ajuste por tipo de conductores

Puntos de acceso por kilómetro	Reducción de la velocidad a flujo libre (km/h)
0	0.0
6	4.0
12	8.0
18	12.0
≥ 24	16.0

Tabla 2.9

Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso

Fuente:

Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Factor de hora pico

El factor de la hora pico (FHP) representa la variación en la circulación dentro de una hora. Las observaciones de la circulación indican constantemente que los caudales encontrados en el período de 15 minutos del pico dentro de una hora no se encuentran sostenidos a través de la hora completa. El uso del factor de la hora pico en la ecuación anterior está considerando este fenómeno.

1. La distancia libre lateral total es la suma de todas distancias laterales que se encuentren en el medio (si son superiores a 1.8 metros, utilizar este valor); por tanto, para el propósito del análisis, la distancia libre lateral no deberá exceder 3.6 metros, o lo que es lo mismo, no existiría afectación sobre la velocidad si esta distancia total es mayor de dicha magnitud.

En vías multicarriles, los valores típicos del factor de hora pico, FHP varía entre 0.80 y 0.95. Un factor de hora pico bajo es característico de condiciones rurales.

Factores altos son condiciones típicas de entornos urbanos y suburbanos en condiciones de hora pico. Los datos del campo deben ser utilizados en lo posible para desarrollar el cálculo del factor de hora pico de condiciones locales.

Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

Los volúmenes de tráfico de las vías multicarriles generalmente incluyen una mezcla de diferentes tipos de vehículos (autos, buses y camiones). Éstos deberán ajustarse a una proporción de flujo equivalente expresada en vehículos de pasajero por hora por el segmento básico de autopista. Este ajuste se realiza usando el factor de ajuste f_{HV} . Una vez se encuentran los valores de equivalentes de Camiones, E_T y de vehículos recreacionales, E_R , el factor de ajuste f_{HV} es determinado usando la ecuación que se presenta a continuación:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)} \quad 2.8$$

donde

E_T, E_R = factores de equivalencia de camiones o vehículos recreacionales en vehículos de pasajeros (RV) dentro de la corriente del tráfico respectivamente.

P_T, P_R = porcentaje de camiones y vehículos recreacionales en la corriente del tráfico respectivamente.

f_{HV} = Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

Los ajustes para los vehículos pesados de la corriente del tráfico se refieren a tres tipos de vehículos: camiones, buses y vehículos recreativos. No hay ninguna evidencia para indicar las diferencias entre el comportamiento de los camiones y los buses en las vías multicarriles; por consiguiente camiones y buses se tratan idénticamente.

En muchos casos, los camiones serán los únicos vehículos que se presenten en la corriente del tráfico en grado significativo. Donde el porcentaje de vehículos recreacionales sea bajo comparado con el porcentaje de camiones, a veces es conveniente considerar todos los vehículos pesados, como camiones. Hacer esto es generalmente aceptable donde el porcentaje de camiones y buses es, por lo menos, cinco veces el porcentaje de vehículos recreacionales.

El factor f_{HV} se calcula en un proceso de dos pasos. Primero, se determina el factor de equivalencia (E_T) y el factor de equivalencia de camiones o vehículos recreacionales en vehículos de pasajeros (E_R) en las condiciones prevalentes de operación. El segundo paso consiste en la utilización de los valores de E_T y E_R para el cálculo del factor de ajuste por vehículos pesados f_{HV} , en la corriente del tráfico.

El efecto de los vehículos pesados en la corriente del tráfico depende de las condiciones de pendientes, así como de la composición de los volúmenes de tráfico. Pueden seleccionarse los factores de equivalencia de vehículos de pasajero para una de las tres condiciones siguientes: los segmentos extendidos de autopista, pendientes ascendentes y pendientes descendentes.

Segmentos extensos de autopistas

Es a menudo apropiado considerar una longitud extendida de segmentos de autopis-

ta que contiene un número de ascensos, descensos y a nivel, como un solo segmento uniforme. Esto es posible donde una pendiente no es suficientemente larga y no tiene un efecto significativo en el funcionamiento de todo el segmento. Como una pauta, el análisis del segmento extendido puede usarse donde la pendiente del 3% no es mayor de 0.8 km o donde la pendiente es menor de 3% en longitudes no mayores de 1.6 km.

Pendientes específicas

Cualquier pendiente igual o menor de 3% en una longitud de 1.6 kilómetros o cualquier pendiente mayor de 3% en una longitud mayor de 0.8 kilómetros debe analizarse como un segmento separado debido a su efecto significativo en el flujo de tráfico.

Factores de equivalencia para segmentos de autopista extendidos

Siempre que un segmento básico de autopista extendido se use, el análisis del terreno de la autopista debe ser clasificado como a nivel, ondulado o montañoso.

Terreno a nivel

El terreno a nivel es cualquier combinación de pendientes horizontal y vertical en la que los vehículos pesados pueden mantener la misma velocidad de los vehículos de pasajeros. Este tipo de terreno incluye pendientes cortas y no mayores al 2%.

Terreno ondulado

El terreno ondulado es cualquier combinación de pendiente horizontal y vertical que causa en los vehículos pesados una reducción

sustancial de la velocidad, por debajo de la velocidad de los vehículos livianos, pero esto no causa que los vehículos pesados deban operar a velocidades para alguna longitud significativa de tiempo o a intervalos frecuentes.

La velocidad crítica de pendiente o velocidad crítica sostenida es la máxima velocidad que los camiones pueden mantener en una pendiente ascendente extendida en un tanto por ciento. Si alguna pendiente es demasiado larga durante mucho tiempo, se obligará a los camiones a disminuir la velocidad a la velocidad crítica sostenible que pueden mantener en las distancias extendidas.

Terreno montañoso

El terreno montañoso es cualquier combinación de pendiente horizontal y vertical que causa en los vehículos pesados una operación a velocidades críticas para distancias significativas o a intervalos frecuentes.

La Tabla 2.10 presenta los factores de equivalencia de vehículos de pasajeros para los segmentos básicos de autopista extendidos.

Factor	Tipo de terreno		
	Nivel	Ondulado	Montañoso
E_T (camiones y buses)	1.5	2.5	4.5
E_R (RV)	1.2	2.0	4.0

Tabla 2.10
Factores de equivalencia para segmentos extensos de autopistas

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Factores de equivalencia para pendientes específicas

Cualquier autopista de más de 1.6 km con pendientes menores del 3% o de longitud de 0.8 km para pendientes del 3% o más deberán ser consideradas como segmentos separados. El análisis de tales segmentos debe tener en cuenta la pendiente de ascenso y de descenso y si la pendiente es aislada o es un

valor constante que forma parte de una serie compuesta.

Equivalencias para pendientes específicas de ascenso

En la Tablas 2.11 y 2.12, se presentan los factores de equivalencia para las pendientes específicas de ascenso y los valores de E_T y E_R para los segmentos de ascenso, respectivamen-

te. Estos factores cambian con la variación de la pendiente en porcentaje, la longitud de la autopista y la proporción de vehículos pesados en la corriente del tráfico. Los valores máximos de E_T y E_R ocurren cuando hay sólo unos vehículos pesados. Los factores de equivalencia disminuyen cuando el número de vehículos pesados se incrementa, porque éstos tienden a formar pelotones y a tener características de

Tabla 2.11
Factor de ajuste por pendientes específicas de ascenso para buses y camiones

Pendiente (%)	Longitud (km)	E_T								
		Porcentaje de buses y camiones								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	Todas	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
≥ 2-3	>0.4-0.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.8-1.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>1.2-1.6	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>1.6-2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>2.4	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
> 3-4	>0.4-0.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	>0.8-1.2	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>1.2-1.6	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>1.6-2.4	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
	>2.4	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
> 4-5	>0.4-0.8	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.8-1.2	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>1.2-1.6	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.6	5.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
	0.0-0.4	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
> 5-6	>0.4-0.5	4.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.5-0.8	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>0.8-1.2	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.2-1.6	5.5	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.6	6.0	5.0	5.0	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	0.0-0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
> 6	>0.4-0.5	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.5-0.8	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.8-1.2	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
	>1.2-1.6	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5
	>1.6	7.0	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0
	0.0-0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Pendiente (%)	Longitud (km)	E_R								
		Porcentaje de buses y camiones								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	Todas	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
> 2-3	0.0 – 0.8	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	> 0.8	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2
> 3-4	0.0 – 0.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	> 0.4-0.8	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	> 0.8	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5
> 4-5	0.0 – 0.4	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	4.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 0.8	4.5	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0
> 5	0.0 – 0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5
	> 0.4-0.8	6.0	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0
	> 0.8	6.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0

Tabla 2.12
Factor de ajuste por pendientes específicas de ascenso para vehículos recreativos

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

operación más uniforme que un grupo de vehículos livianos.

Equivalentes para pendientes de descenso

Hay pocos datos específicos en el efecto de vehículos pesados en la corriente del flujo de tráfico en los descensos. Para vías multicarriles, las condiciones de buses y camiones en vías de cuatro y seis carriles se encuentran representadas en la Tabla 2.13. Para pendientes menores de 4% y longitud menor de 3,2 kilómetros, se deben usar como equivalentes los valores determinados para las condiciones a nivel. Para las pendientes mayores de 4% y longitudes mayores de 3,2 kilómetros, se deben utilizar los valores dados en la Tabla 2.13.

Para todos los casos, los vehículos recreacionales, VR, pueden tratarse en descensos como si fuera terreno a nivel.

Equivalentes para pendientes compuestas

El alineamiento vertical de la mayoría de las vías multicarriles origina una serie conti-

nua de pendientes, por lo que a menudo es necesario determinar el efecto de una serie de pendientes significativas en una sucesión. La técnica seguida es realizar el cálculo de la pendiente media en el punto en cuestión. La pendiente media se define como el levantamiento total del principio de la pendiente compuesta dividida entre la longitud de la pendiente.

La pendiente media es un acercamiento aceptable para pendientes en que todas las subdivisiones son menores del 4% la longitud total de la pendiente compuesta y menor de 1.200 metros.

Factor de ajuste por la población de conductores

Las características de la corriente de tráfico, base de esta metodología, es representativa de conductores viajeros regulares en la corriente de tráfico, en la que la mayoría de los conductores está familiarizada con el medio por el cual circula. Generalmente se acepta que las corrientes de tráfico con características diferentes (por ejemplo, conductores de vehículos recreacionales) utilizan la vía multicarril

Tabla 2.13
Factor de ajuste por
pendientes
en descenso
para buses
y camiones

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Pendiente negativa (cuesta abajo)	Longitud (km)	E _T			
		Porcentaje de camiones			
		5	10	15	20
< 4	Todas	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	> 6.4	2.0	2.0	2.0	1.5
> 5-6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 5-6	> 6.4	5.5	4.0	4.0	3.0
> 6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 6	> 6.4	7.5	6.0	5.5	4.5

menos eficazmente. Considerando que los datos y la información varían sustancialmente, se han encontrado capacidades más bajas en fines de semana, particularmente en las áreas recreativas.

El factor de ajuste, f_p , se usa para reflejar este efecto. Los valores de rango del f_p varían de 0.85 a 1.00. En general, el analista debe seleccionar 1.00, que refleja el tráfico del viajero común (es decir, los usuarios familiares), a menos que haya evidencia suficiente de que debe aplicarse un valor más bajo. Donde se necesite exactitud mayor, se recomienda realizar un estudio del tipo de viajero y del flujo de tráfico recreativo y de velocidades.

Determinación del nivel de servicio

El primer paso para determinar el nivel de servicio para una vía multicarril consiste en definir y segmentar la vía multicarril apropiadamente. El segundo es estimar por medición la velocidad a flujo libre, VFL, o a partir de un valor base, con lo cual se construye una curva de volumen-velocidad apropiada de la misma forma como se presentan las curvas típicas de la Figura 2.5. Para el tercer paso, teniendo trazadas la tasa de flujo, VP, y la curva de volumen-velocidad, se lee la velocidad media del automóvil de pasajero en el eje Y de la mencionada Figura 2.5. El próximo

paso es calcular la densidad utilizando la Ecuación

$$D = \frac{V_p}{S} \quad 2.9$$

donde

D = densidad [autos/km/carril]

V_p = Tasa de flujo [autos/km/carril]

S = Velocidad media de los autos [km/h]

Finalmente, el nivel de servicio de la vía multicarril se determina comparando la densidad calculada, D , con la presentada en la Tabla 2.5.

Segmentación de la vía multicarril

Se deben considerar segmentos diferentes en el análisis, cuando se presentan las siguientes condiciones:

- ◆ Cambio en el número de carriles en la vía multicarril.
- ◆ Cambio en el tipo de separador en la vía multicarril.
- ◆ Cambio de pendiente en un 2% o más, o incremento de la pendiente ascendente en más de 1220 m.
- ◆ Presencia de dispositivos de control de tráfico, como semáforos o señales de parada en la vía multicarril.

- ◆ Cambio significativo en la densidad de puntos de acceso.
- ◆ Cambio en los límites de velocidad.
- ◆ Presencia de una condición de cuello de botella.

En general, al segmentar una vía multicarril para el análisis, la longitud mínima de un segmento en estudio debe ser 760 metros. También los límites de segmentos del estudio deben ser mayores de 0.4 kilómetros de distancia a una intersección semaforizada. Los procedimientos del capítulo están basados en el promedio de las condiciones observadas en un segmento de vía multicarril, extendido con características físicas generalmente consistentes.

Luego de recolectar información de campo en cuatro tramos de vías con características de multicarriles, en la ciudad de Bogotá y a partir de un análisis conceptual, en la Figura 2.6 se presenta la curva volumen contra velocidad para el conjunto de datos recolectados.

2.3.3 Secciones básicas de autopistas

En el análisis de las estructuras se ha querido incluir viales, las secciones básicas de autopista como parte integral del presente documento; sin embargo, es necesario resaltar que en nuestro medio no se tiene aplicación, pues la ciudad no cuenta con este tipo de estructura que permita validar su aplicación metodológica.

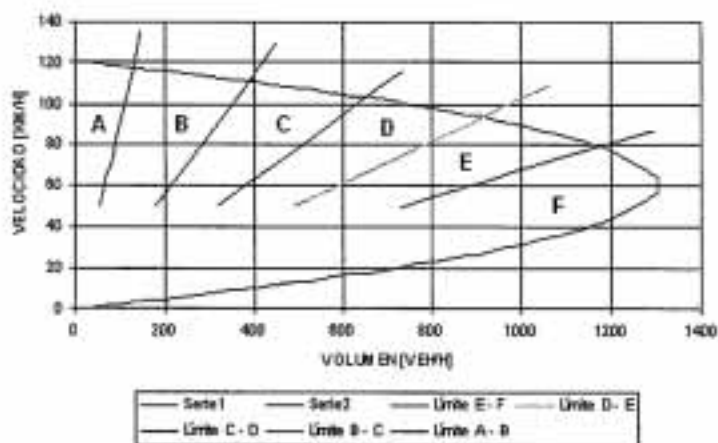


Figura 2.6
Curvas de capacidad contra volumen, caso Bogotá

Fuente:
elaboración propia, metodología desarrollada en el Tomo II, Capítulo 7.

2.3.3.1 Características físicas y funcionales

Una autopista se define como una carretera dividida con control total de accesos y con dos o más carriles para el uso exclusivo de tráfico en cada dirección. Las autopistas proporcionan el flujo sin interrupciones. No hay ninguna intersección señalizada o elemento que detenga el flujo o lo controle; el acceso directo y de la propiedad adyacente no se permite. Sólo se permite el acceso a la autopista donde se presenten rampas. Las direcciones contrarias de flujo están continuamente separadas por una barrera levantada, un separador a nivel o un separador levantado continuamente.

Las condiciones de operación en una autopista son el resultado de las interacciones de los vehículos y conductores en la corriente del tráfico y de los vehículos, conductores y las características geométricas de la autopista.

La operación también puede estar afectada por las condiciones medioambientales, como el tiempo y la luminosidad, por las condiciones del pavimento y por la ocurrencia de accidentes de tráfico.

Una vía de peajes es similar a una autopista, sólo que los peajes se encuentran en puntos designados a lo largo de la infraestructura. Aunque la colección de peajes involucra interrupciones de tráfico, estos medios generalmente pueden tratarse como las autopistas. Sin embargo, debe prestarse atención especial a las características únicas, las represiones y los retrasos causados por los medios de recaudación por peaje.

El sistema de la autopista es el total de la suma de todos los elementos en una área dada. El analista debe comprender que los elementos de la autopista pueden tener otras interacciones con otros cercanos, como las calles locales, y deberá considerar las interacciones con estos otros medios. El funcionamiento de la autopista puede afectarse cuando la demanda excede la capacidad en las partes cercanas de la calle local o sistema de la autopista o cuando la capacidad de la calle o rampa que miden el sistema limita la demanda que se acerca a la autopista.

Si la malla vial no puede acomodarse a la demanda que sale de la autopista, su sobresaturación puede producir colas que lleguen hasta la autopista y afectan su funcionamiento. En efecto, la capacidad limitada de la malla vial reduce la capacidad efectiva de la rampa de salida. Por consiguiente, si el flujo corriente arriba de las vías puede acomodar la demanda de salida de la autopista, ésta puede ser un factor importante en el análisis de los medios de la autopista, que se refleja en su funcionamiento. Igualmente, la presencia de mediciones en la rampa afecta la demanda de la autopista y debe tenerse en cuenta para analizar el medio de la autopista.

También se asume que los medios de la autopista no tendrán ninguna interacción con autopistas adyacentes. Las condiciones de flujo libre deben existir corriente arriba

y corriente abajo de la estructura en análisis. En otros términos, el análisis de un medio de la autopista puede hacerse sólo localmente con sobresaturación dentro de su dominio del tiempo-espacio.

Los segmentos básicos de autopista son aquellos que se encuentran fuera del área de influencia de rampas o de áreas de entrecruzamiento de la autopista (Figura 2.7).

2.3.3.2 Condiciones básicas para el análisis

Las condiciones básicas en que se alcanza la capacidad total de un segmento básico de autopista son: buen estado del tiempo, buena visibilidad, y ningún evento o accidente. Para el análisis se supone que existen estas condiciones básicas. Si cualquiera de estas condiciones no existe, la velocidad, el nivel de servicio y la capacidad del segmento básico de la autopista tiende a reducirse.

La relación de velocidad-flujo-densidad específica de un segmento básico de la autopista depende del tráfico prevaleciente y de las condiciones de la carretera.

Se pueden establecer unas mínimas condiciones para los segmentos básicos de la autopista. Estas condiciones sirven como punto de partida para la metodología de análisis.

- ◆ Ancho mínimo de carril = 3.6 m.
- ◆ Mínima distancia libre lateral de la berma derecha entre el borde del carril y el obstáculo más cercano u objeto que influye en la conducta del tráfico de 1.8 m.
- ◆ Mínima distancia libre lateral en el separador del medio de 0.6 m.
- ◆ Corriente del tráfico compuesta exclusivamente por vehículos de pasajeros.
- ◆ Cinco o más carriles para una dirección (sólo en las áreas urbanas).

- ◆ Espaciamiento entre intercambiadores cada 3 kilómetros o más.
- ◆ Terreno a nivel con pendientes no mayores al 2%.
- ◆ Población de conductores compuesta principalmente de usuarios regulares de la autopista.

Las limitaciones para la aplicación de esta metodología se plantean a continuación:

- ◆ Carriles especiales, reservados para un solo tipo de vehículo, como el caso de los carriles para vehículos de alta ocupación, carriles para camiones y carriles de subida (adelantamiento).
- ◆ Segmentos extensos sobre puentes y túneles.
- ◆ Segmentos cercanos a un peaje.
- ◆ Autopistas con velocidades de flujo libre por debajo de 90 km/h o más de 120 km/h.
- ◆ Condiciones de demanda que sobrepasen la capacidad.
- ◆ La influencia de obstáculos corriente abajo que formen colas en un segmento.
- ◆ Velocidades límites, la magnitud de entrada policiaca o la presencia de sistemas inteligentes de transporte relacionadas con el vehículo o guía a los conductores.
- ◆ Efectos de las rampas de entrada.

El analista tendría que investigar y desarrollar las modificaciones especiales del propósito de esta metodología para incorporar los efectos de las condiciones anteriores.

2.3.3.3 Metodología

La metodología descrita a continuación corresponde al análisis de segmentos básicos

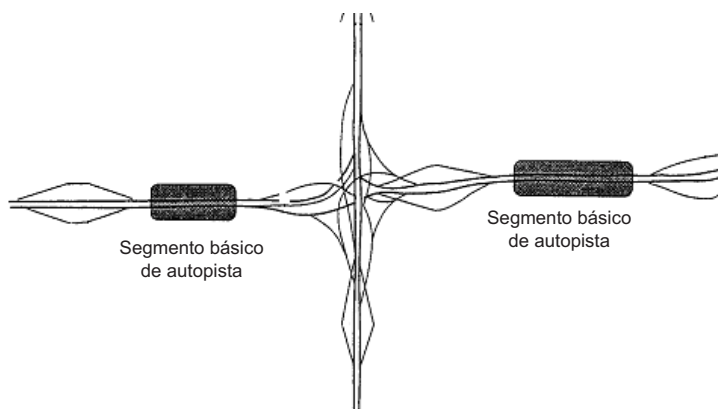


Figura 2.7
Segmento o sección básica de autopista

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

de autopista. En la Figura 2.8 se ilustra la entrada y el orden del cómputo del método para los segmentos básicos de autopista.

Niveles de servicio

Un segmento de la autopista básico puede caracterizarse por tres medidas de la actuación: la densidad por lo que se refiere a los automóviles de pasajero por kilómetro por carril, velocidad del automóvil de pasajero y la relación volumen a capacidad (v/c). Cada una de estas medidas es una indicación de lo efectivo del flujo de tráfico por la autopista.

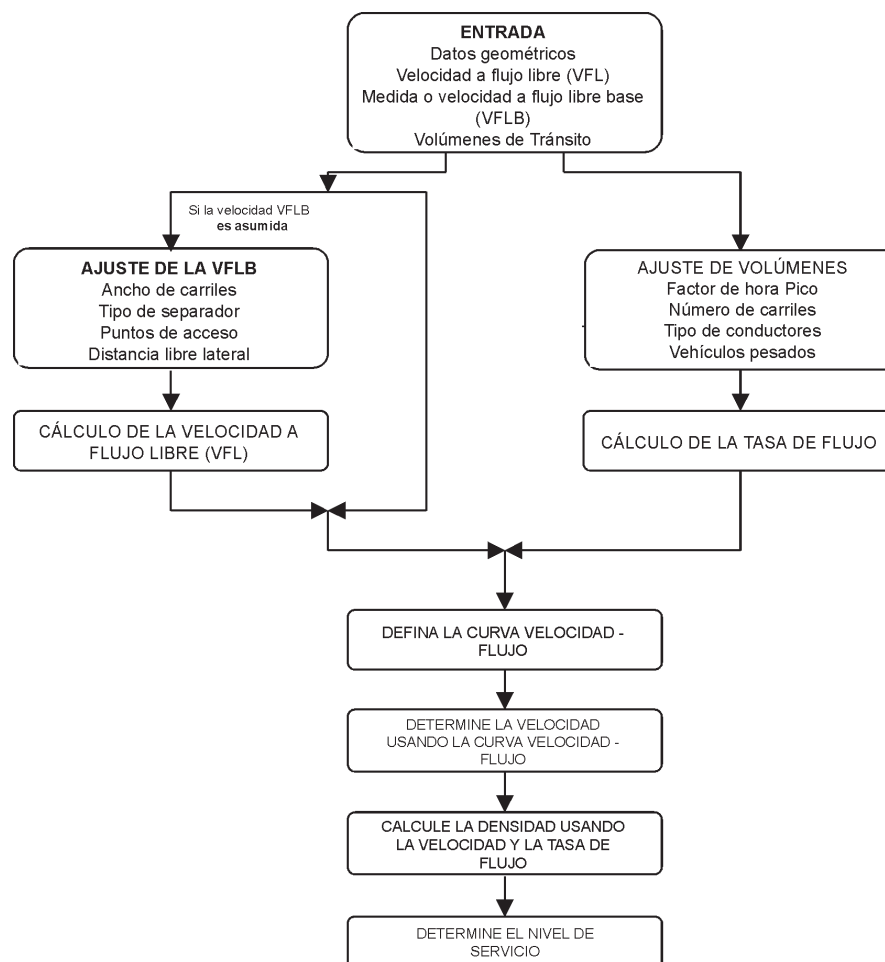
Nivel de servicio A

Describe el funcionamiento a flujo libre. Las velocidades a flujo libre prevalecen. Los vehículos están completamente habilitados para maniobrar dentro de la corriente de tráfico. Los efectos de incidentes o averías en determinado punto son fácilmente absorbidos en este nivel.

Nivel de servicio B

Representa un flujo libre razonable; se mantienen las velocidades en condiciones de

Figura 2.8
Esquema metodológico para el análisis de secciones básicas de autopista



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

flujo libre. La habilidad de maniobrar en la corriente del tráfico sólo se restringe ligeramente, y el nivel general de confort físico y psicológico que se proporciona a los usuarios aún es alto. Todavía se absorben fácilmente los efectos de incidentes menores y averías en determinado punto.

Nivel de servicio C

Mantiene el tráfico con velocidades en condiciones de flujo libre o cerca de ella. La libertad para maniobrar en la corriente del tráfico se restringe notoriamente, y los cambios de carril requieren más cuidado y atención del conductor. Todavía pueden absorberse los in-

cidentes menores, pero el deterioro local en la operación será sustancial. Puede esperarse formación de colas detrás de algún obstáculo significativo.

Nivel de servicio D

Es el nivel en el cual las velocidades empiezan a disminuir ligeramente debido al incremento de los volúmenes de tránsito; la densidad empieza a aumentar significativamente. La libertad para maniobrar en la corriente del tráfico es notoriamente limitada, y el conductor experimenta niveles reducidos de confort físico y psicológico. Incluso puede esperarse que los incidentes menores formen

colas de espera, porque la corriente de tráfico tiene un pequeño espacio para absorber las rupturas.

Nivel de servicio E

Describe el funcionamiento a régimen de capacidad plena. El funcionamiento en este nivel es volátil, porque no hay casi ningún espacio utilizable en la corriente de tráfico. Los vehículos, estrechamente espaciados, tienen pequeños espacios para maniobrar en la corriente de tráfico a velocidades que todavía exceden 80 km/h. Cualquier ruptura de la corriente de tráfico, como cuando los vehículos entran de una rampa o un vehículo cambia de carril, puede establecer una ola de ruptura que se propaga a lo largo del flujo de tráfico corriente arriba. La corriente de tráfico no puede disipar la ruptura y se espera que cualquier incidente produzca una avería seria ante la formación de largas colas de espera. La maniobrabilidad en la corriente del tráfico está sumamente limitada, y el nivel de confort físico y psicológico del conductor es pobre.

Nivel de servicio F

Describe las fracciones en el flujo vehicular. Éstas ocurren por varias razones:

- ♦ Los incidentes del tráfico pueden reducir de modo temporal la capacidad de un segmento corto, porque el número de vehículos que llegan al punto es mayor que el número de vehículos que pueden moverse a través de él.
- ♦ Puntos de repetición de la congestión, como una convergencia o entrecruzamiento y eliminación de carriles; una demanda muy alta en que el número de vehículos que llegan es mayor que el número de vehículos que se descargan.

- ♦ En situaciones previstas de hora pico (u otra hora), la tasa de flujo puede exceder la capacidad estimada de la situación.

Nótese que en todos los casos, la fracción del flujo ocurre cuando la proporción de demanda existente sobre la capacidad real o de demanda de previsión a la capacidad estimada excede 1.00. La operación inmediata corriente arriba de este punto generalmente está cerca de la capacidad, y mejora el funcionamiento corriente abajo.

El funcionamiento del nivel de servicio F en una cola es el resultado de una fracción o cuello de botella en un punto corriente arriba. El nivel de servicio F se utiliza también para describir las condiciones del punto de fracción o cuello de botella y la cola de descarga del flujo que ocurre a las velocidades bajas del nivel de servicio E. Siempre que el nivel de servicio de condiciones F exista, se tiene el potencial para que se extienda corriente arriba con distancias significativas.

En la Tabla 2.14 se presentan los rangos de densidad para la determinación del nivel de servicio en segmentos básicos de autopistas.

Nivel de servicio	Rango de densidad (Vehículos livianos/km/carril)
A	0 - 7
B	> 7 - 11
C	> 11 - 16
D	> 16 - 22
E	> 22 - 28
F	> 28

Tabla 2.14 Niveles de servicio en segmentos básicos de autopista

Fuente:
Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000)

Para cualquier nivel de servicio dado, la densidad aceptable máxima es algo baja en comparación con el nivel de servicio correspondiente en las carreteras multicarril. Esto refleja la calidad más alta de los conductores cuando usan las autopistas, comparadas con las vías multicarriles.

El valor superior mostrado para un nivel de servicio E (28 vehículos livianos/km/carril) es la densidad máxima a la que se espera ocurran los flujos a capacidad. En la siguiente figura se presentan los criterios de los niveles de servicio para velocidades a flujo libre de 120 km/h., 110 km/h., 100 km/h y 90 km/h.

En la Figura 2.9 se presenta la relación entre la velocidad, el flujo, la densidad y el nivel de servicio para segmentos básicos de autopista.

Capacidad para varias velocidades a flujo libre: para los valores 2.400, 2.350, 2.300 y 2.250 veh/km/carril corresponden velocidades de 120, 110, 100 y 90 km/h, respectivamente.

Para $90 \leq VFL \leq 120$ y para tasas de flujo (v_p)

$$(3.100 - 15VFL) > v_p \leq (1.800 + 5VFL),$$

$$S = VFL - \left[\frac{\frac{1}{28} (23VFL - 1800)}{\left(\frac{v_p + 15VFL - 3100}{20VFL - 1300} \right)^{2.6}} \right] \quad 2.10$$

Para $90 \leq VFL \leq 120$ y para tasas de flujo (v_p)

$$v_p \leq (3.100 - 15VFL),$$

$$S = VFL \quad 2.11$$

Determinación de la velocidad a flujo libre, VFL

La velocidad a flujo libre (VFL) es la velocidad media de los vehículos livianos, medida durante flujos bajos a moderados (arriba de 1.300 vehículos livianos/h/carril). Para un segmento específico de autopista, las velocidades son constantes en este rango de proporciones de flujo. Se utilizan dos métodos para determinar la velocidad a flujo libre de un segmento básico de autopista:

El primero de ellos hace referencia a la medición en campo; el segundo, a la estimación con base en lo presentado en esta sección.

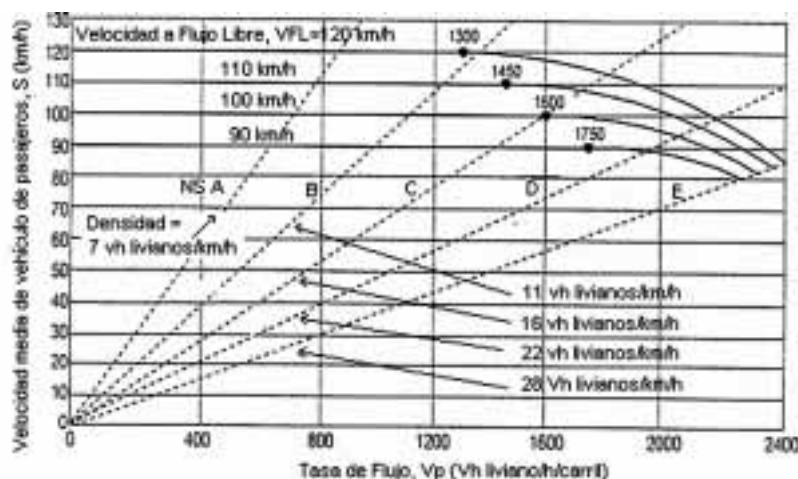
Procedimiento de campo para la determinación de la velocidad a flujo libre

El procedimiento de la medición en campo lo realiza personal entrenado que recoge los datos directamente. Sin embargo, no se requieren las dimensiones del campo para la aplicación del método. Si se usan los datos recopilados en campo, ningún ajuste se debe hacer a la velocidad de flujo libre, VFL.

Figura 2.9

Curvas velocidad - flujo y niveles de servicio en segmentos básicos de autopista

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)



Criterio	Nivel de Servicio				
	A	B	C	D	E
VFL = 120 km/h					
Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	28
Mínima velocidad (km/h)	120.0	120.0	114.6	99.6	85.7
Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.35	0.55	0.77	0.92	1.00
Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	840	1320	1840	2200	2400
VFL = 110 km/h					
Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	28
Mínima velocidad (km/h)	110.0	110.0	108.5	97.2	83.9
Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.33	0.51	0.74	0.91	1.00
Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	770	1210	1740	2135	2350
VFL = 100 km/h					
Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	28
Mínima velocidad (km/h)	100.0	100.0	100.0	93.8	82.1
Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.30	0.48	0.70	0.90	1.00
Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	700	1100	1600	2065	2300
VFL = 90 km/h					
Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	28
Mínima velocidad (km/h)	90.0	90.0	90.0	89.1	80.4
Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.28	0.44	0.64	0.87	1.00
Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	630	990	1440	1955	2250

Tabla 2.15
Criterios
para la
determinación
del nivel de
servicio en
segmentos
básicos de
autopista

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

El estudio de velocidad debe dirigirse a una situación representativa del segmento cuando fluye y cuando las densidades son bajas (las proporciones de flujo pueden ser de 1.300 vehículos livianos/h/carril en adelante). Se debe realizar en horas valle, pues permiten observar adecuadamente las proporciones de flujo. El estudio de velocidad debe medir las velocidades de todos los vehículos livianos o debe usar una muestra sistemática (por ejemplo cada 10 carros). El estudio de velocidad debe medir las velocidades de los vehículos livianos. Se debe obtener una muestra de por lo menos 100 automóviles livianos. Puede usarse cualquier técnica de medida de velocidad que se ha encontrado aceptable para otros tipos de tráfico que diseña los estudios de velocidad.

El analista debe tener cuidado para no asumir que la velocidad a flujo libre (VFL)

para una autopista es igual a su límite de velocidad anunciado o la velocidad del percentil 85 medida en campo. La velocidad a flujo libre es la velocidad media medida en el campo cuando los volúmenes están al menos en valores cercanos a los 1.300 vehículos livianos /h/carril.

Procedimiento de estimación de la velocidad a flujo libre basándose en la velocidad a flujo libre base, VFLB

Si los datos de mediciones de campo no se encuentran disponibles, la velocidad a flujo libre puede estimarse aplicando los ajustes a la velocidad de flujo libre base. La VFLB es 120 km/h para las autopistas rurales y 100 km/h para las autopistas urbanas y suburbanas. La velocidad a flujo libre base está reducida por los efectos de ancho de los carriles, distancia li-

bre lateral, número de carriles y por la densidad de intercambios que se presentan, utilizando la ecuación que se presenta a continuación:

$$VFL = VLFB - f_{LW} - f_{LC} - f_N - f_{ID} \quad 2.12$$

donde

VFL = velocidad a flujo libre [km/h]

$VLFB$ = Velocidad a flujo libre base, 110 km/h (urbano) o 120 km/h (rural) [km/h]

f_{LW} = factor de ajuste por ancho de carril [km/h]

f_{LC} = factor de ajuste por distancia libre lateral en la berma derecha [km/h]

f_N = factor de ajuste por número de carriles [km/h]

f_{ID} = factor de ajuste por densidad de intercambios [km/h]

Factor de ajuste por ancho de carril

La condición base del ancho del carril es 3.6 m o más. Cuando el ancho promedio de todos los carriles es menor de 3,6 m, la velocidad de flujo libre base (por ejemplo, a 120 km/h) se reduce. En la Tabla 2.16 se presentan ajustes para reflejar el efecto de carriles más angostos.

Tabla 2.16
Factor de ajuste por ancho de carril

Ancho de Carril	Reducción de la velocidad a flujo libre, f_{LW} (km/h)
3.6	0.0
3.5	1.0
3.4	2.1
3.3	3.1
3.2	5.6
3.1	8.1
3.0	10.6

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Factor de ajuste por distancia libre lateral

La base de la distancia libre lateral es 1.8 m o más en el lado derecho y 0.6 m o más en el lado izquierdo o del separador central, los cuales deben ser medidos desde el borde exterior de la berma pavimentada hasta el borde más cercano del carril. Cuando la distancia libre lateral en la berma es menor de 1.8 m, la velocidad a flujo libre base será reducida. En la Tabla 2.17 se dan ajustes para reflejar el efecto de carriles angostos de la distancia libre lateral. No existe ajuste disponible para reflejar el efecto de las distancias libres laterales a la izquierda o en el separador izquierdo menores de 0.6 m. Lo anterior debido a que distancias mínimas laterales menores de 0.6 m en el lado izquierdo de una autopista son consideradas inusuales. El juicio considerable debe hacerse determinando si objetos o barreras a lo largo del lado derecho de la autopista son una verdadera obstrucción. Tales obstrucciones pueden ser continuas, como muros de contención, barreras en concreto o defensas metálicas, o discontinuas, como postes de luz o estribos de puentes. En algunos casos, los conductores pueden acostumbrarse a ciertos tipos de obstrucciones en la cual su influencia en el flujo de tráfico puede descartarse.

Factor de ajuste por número de carriles

Los segmentos básicos de autopista con cinco o más carriles (en una dirección) es considerada como la condición base con respecto al número de carriles. Cuando se presentan menos carriles, se reduce la velocidad a flujo libre base. La Tabla 2.18 proporciona los ajustes para reflejar el efecto del número de carriles.

Para llevar a cabo el ajuste del número de carriles en la velocidad a flujo libre, VFL, se debe considerar el número de carriles básicos y auxiliares. No deben ser incluidos los carriles especiales como de alta ocupación vehicular, VAO, pues éstos también forman parte del desarrollo estructural de la vía.

Los ajustes presentados en la Tabla 2.18 son exclusivamente datos medidos en las autopistas urbanas y suburbanas; por tanto, no reflejan las condiciones en autopistas rurales que típicamente llevan dos carriles en cada dirección. Para estimar la velocidad a flujo libre de una autopista rural segmentada, el valor del ajuste para el número de carriles, f_N , deberá ser 0.0.

Factor de ajuste por densidad de intercambiadores

La densidad base de intercambiadores es 0.3 intercambiadores por kilómetro, o con un espaciamiento promedio de 3,3 kilómetros por intercambiador. La velocidad a flujo libre base se reduce cuando se presenta un mayor número de intercambiadores y, por tanto, su densidad sube. En la Tabla 2.19 se proporcionan ajustes para reflejar el efecto de densidad del intercambio.

La densidad del intercambio está determinada en un segmento de 10 km. El segmento de autopista (5 km corriente arriba y 5 km corriente abajo) sobre el cual se localiza el segmento de la autopista. Un intercambiador se define como el que tiene al menos una rampa de entrada. Por consiguiente, los intercambios que tienen sólo rampas de salida no serían considerados en la determinación de la densidad de intercambiadores. Entre los intercambiadores se deberán incluir intercambiadores típicos con arterias o carreteras e intercambiadores mayores entre autopistas.

Distancia libre lateral derecha (m)	Reducción de la velocidad a flujo libre, f_{LC} (km/h)			
	Carriles en una dirección			
	2	3	4	≥ 5
≥ 8	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	1.0	0.7	0.3	0.2
1.2	1.9	1.3	0.7	0.4
0.9	2.9	1.9	1.0	0.6
0.6	3.9	2.6	1.3	0.8
0.3	4.8	3.2	1.6	1.1
0.0	5.8	3.9	1.9	1.3

Tabla 2.17
Factor de ajuste por distancia libre lateral

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Número de carriles (en una dirección)	Reducción de la velocidad a flujo libre, f_N (km/h)
≥ 5	0.0
4	2.4
3	4.8
2	7.3

Tabla 2.18
Factor de ajuste por número de carriles

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000, p. 23-6).

Intercambiadores por kilómetro	Reducción de la Velocidad a Flujo Libre, f_{ID} (km/h)
≥ 0.3	0.0
0.4	1.1
0.5	2.1
0.6	3.9
0.7	5.0
0.8	6.0
0.9	8.1
1.0	9.2
1.1	10.2
1.2	12.1

Tabla 2.19
Factor de ajuste por densidad de intercambiadores

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Determinación de la tasa de flujo

La proporción de flujo en cada hora deberá reflejar la influencia de vehículos pesados y la variación temporal de la variación del flujo de tráfico durante una hora, así como las características de la población de conductores o usuarios. Estos efectos se reflejan ajustando los volúmenes de cada hora, que se

presentan típicamente en vehículos mixtos por hora (veh/h), para llegar a una tasa de flujo de vehículos equivalente en autos livianos (vehículos livianos/h). La tasa de flujo de vehículos de pasajero equivalente es el resultado de calcular el factor de equivalencia del vehículo pesado en vehículos livianos. El ajuste de la variación del flujo de tráfico en la hora pico se presenta en la siguiente sección, los resultados de la tasa de flujo equivalente se presentan en vehículos livianos/h/carril. La ecuación que se presenta a continuación se utiliza para calcular la tasa de flujo de vehículos equivalentes.

$$v_p = \frac{V}{FHP \times N \times f_{HV} \times f_p} \quad 2.13$$

donde

v_p = tasa de flujo equivalente en 15 minutos [vh/h/carril]

V = volumen horario [vh/h/carril]

FHP = factor de hora pico

N = número de carriles por sentido

f_{HV} = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

f_p = factor de ajuste por tipo de conductores

Factor de hora pico

El factor de la hora pico (FHP) representa la variación en la circulación en una hora. Las observaciones de la circulación indican constantemente que los caudales encontrados en el período de 15 minutos del pico en una hora no son uniformes en la hora completa. El uso del factor de la hora pico en la ecuación anterior considera este fenómeno.

En segmentos básicos de autopistas, los valores típicos del factor de hora pico varían entre 0.80 y 0.95. Un factor de hora pico más bajo es característico de condiciones rurales.

Factores altos son condiciones típicas de entornos urbanos y suburbanos en condiciones de hora pico. Los datos del campo deben ser utilizados en lo posible para desarrollar el cálculo del factor de hora pico, FHP de condiciones locales.

Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

Los volúmenes de tráfico de autopista generalmente incluyen una mezcla de diferentes tipos de vehículos (autos, buses y camiones). Éstos deberán ajustarse a una proporción de flujo equivalente expresada en vehículos de pasajero por hora por el segmento básico de autopista. Este ajuste se realiza usando el factor de ajuste f_{HV} . Una vez se encuentran los valores de equivalentes de camiones, E_T , y de vehículos recreacionales, E_R , el factor de ajuste, f_{HV} , se determina usando la ecuación

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)} \quad 2.14$$

donde

E_T, E_R = factores de equivalencia de camiones o vehículos recreacionales en vehículos de pasajeros dentro de la corriente del tráfico, respectivamente

P_T, P_R = porcentaje de camiones y vehículos recreacionales en la corriente del tráfico, respectivamente

f_{HV} = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

Los ajustes para los vehículos pesados de la corriente del tráfico corresponden a tres tipos de vehículos: camiones, buses y vehículos recreativos. No hay ninguna evidencia para indicar las diferencias en la actuación

entre los camiones y buses en las autopistas; por consiguiente, se tratan camiones y buses idénticamente.

En muchos casos, los camiones serán los únicos vehículos que se presenten en la corriente del tráfico en grado significativo. Donde el porcentaje de vehículos recreacionales sea bajo, comparado con el porcentaje de camiones, a veces es conveniente considerar todos los vehículos pesados como camiones. Hacer esto es aceptable donde el porcentaje de camiones y buses es por lo menos cinco veces el porcentaje de vehículos recreacionales.

El factor f_{HV} se calcula en un proceso de dos pasos. Primero, se determina el factor de equivalencia de los vehículos de pasajeros para cada camión, bus o vehículo recreativo, R_V , el tipo de la carretera condiciona el estudio. Estos valores de equivalencia, E_T y E_R , representan el número de automóviles de pasajero que usarían la misma cantidad de capacidad de la autopista, como camión, bus o vehículo recreativo, R_V , respectivamente, en las condiciones prevalecientes de la carretera y del tráfico. El segundo paso consiste en utilizar los valores E_T y E_R en la proporción de cada tipo de vehículo en la corriente de tráfico (P_T y P_R) para calcular el factor de ajuste f_{HV} .

El efecto de los vehículos pesados en la corriente del tráfico depende de las condiciones de pendientes, así como de la composición de los volúmenes de tráfico. Pueden seleccionarse los factores de equivalencia de vehículos livianos para una de las tres siguientes condiciones: segmentos extendidos de autopista, pendientes ascendentes y pendientes descendentes.

Segmentos extensos de autopistas

Es a menudo apropiado considerar una longitud extendida de segmentos de autopis-

ta que contiene un número de ascensos, descensos y a nivel como un solo segmento uniforme. Esto es posible en una pendiente que no es suficientemente larga y que no tiene efecto significativo en el funcionamiento de todo el segmento. Como pauta, el análisis del segmento extendido puede usarse donde la pendiente es un 3% o más durante un tramo de 0.5 kilómetros o donde la pendiente es menor de un 3% en longitudes no mayores de 1.0 kilómetro.

Pendientes específicas

Cualquier pendiente menor del 3% que se presenta en longitudes mayores de 1.0 kilómetro o cualquier pendiente del 3% o más en longitudes mayores de 0.5 kilómetros debe analizarse como un segmento separado debido a su efecto significativo en el flujo de tráfico.

Factores de equivalencia para segmentos de autopista extendidos

Siempre que se use un segmento básico de autopista extenso, el análisis del terreno de la autopista debe ser clasificado como a nivel, ondulado o montañoso.

Terreno a nivel

El terreno a nivel es cualquier combinación de pendientes horizontal y vertical en la que los vehículos pesados pueden mantener la misma velocidad de los vehículos de pasajeros. Este tipo de terreno incluye pendientes cortas y no mayores de 2%.

Terreno ondulado

El terreno ondulado es cualquier combinación de pendiente horizontal y vertical que

causa en los vehículos pesados una reducción sustancial de la velocidad, por debajo de los vehículos livianos, sin que los vehículos pesados deban operar a velocidades críticas sostenibles para alguna longitud significativa de tiempo o a intervalos frecuentes.

La velocidad crítica sostenible es la máxima velocidad que los camiones pueden mantener en una pendiente ascendente extendida en un porcentaje dado. Si alguna pendiente es demasiado larga durante mucho tiempo, se obligará a los camiones a disminuir la velocidad a la velocidad crítica sostenible que pueden mantener para las distancias extendidas.

Terreno montañoso

El terreno montañoso es cualquier combinación de pendiente horizontal y vertical que causa en los vehículos pesados una operación a velocidades críticas sostenibles para distancias significativas o a intervalos frecuentes.

La Tabla 2.20 presenta los factores de equivalencia de vehículos de pasajeros para los segmentos básicos de autopista extendidos.

Factor de equivalencia para pendientes específicas

Cualquier autopista de más de 1.0 kilómetro y con pendientes menores del 3% o de longitud de 0.5 kilómetros para pendientes del 3% o más deberán ser consideradas seg-

mentos separados. El análisis de tales segmentos debe considerar la pendiente de ascenso y de descenso y si la pendiente es aislada o es un valor constante que forma parte de una serie compuesta.

Varios estudios señalan que el indicador de las poblaciones de camión de autopista tiene una media de proporción de peso-poder variable entre 75 y 90 kg/KW. Estos procedimientos adoptan el equivalente del carro de pasajero calibrados para una mezcla de camiones-buses en este rango. Los vehículos recreacionales varían considerablemente en tipo y características.

Estos vehículos incluyen los automóviles con remolques. Además, varía la tipología de los vehículos y el grado de habilidad en la conducción de estos vehículos. Los valores típicos de la proporción peso-poder pueden estar en el rango de 20 a 40 kg/kw para los vehículos recreacionales.

Equivalentes para pendientes específicas de ascenso

Los factores de equivalencia para las pendientes específicas de ascenso se muestran en la Tabla 2.21 y la Tabla 2.22, donde se presentan los valores de E_T y E_R para los segmentos de ascenso. Estos factores varían con la pendiente, la longitud de la autopista y la proporción de vehículos pesados en la corriente del tráfico. Los valores máximos de E_T y E_R ocurren cuando hay sólo unos vehículos pesados.

Tabla 2.20
Factores de equivalencia de vehículos de pasajeros en segmentos básicos extendidos
Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Factor	Tipo de terreno		
	A nivel	Ondulado	Montañoso
E_T (camiones y buses)	1.5	2.5	4.5
E_R (vehículos recreacionales)	1.2	2.0	4.0

Los factores de equivalencia disminuyen tanto como el número de vehículos pesados se incrementa, porque estos vehículos tienden a formar pelotones y tener características de operación más uniforme que un pelotón de vehículos livianos.

La longitud de la pendiente se toma de un perfil de la carretera en cuestión; el valor típico incluye la porción recta de la pendiente más alguna porción de la curva vertical al inicio y terminación de la pendiente. Se recomienda que el 25% de la longitud de las curvas verticales al inicio y terminación de la pendiente sean incluidas en la longitud de la calidad. Cuando haya dos pendientes ascendentes consecutivas se asigna un 50% de la longitud de la curva vertical entre ellas a la longitud de cada pendiente de ascenso.

Analizando las pendientes de ascenso, el punto de interés es el extremo de la pendiente donde los vehículos pesados tienen el efecto máximo en su funcionamiento. Éste no siempre es el caso; sin embargo, si una unión de rampa se localiza en la mitad de la pendiente, este punto será una situación crítica para el análisis. En el caso de pendientes compuestas, el punto crítico de análisis es el punto en que los vehículos pesados viajan más lentamente. Si una pendiente del 5% es seguida por una pendiente del 2%, es razonable suponer que el extremo de la porción de la pendiente del 5% será crítico, y se esperaría que los vehículos pesados acelerarán en la porción de la pendiente del 2%.

Equivalentes para pendientes de descenso

Hay pocos datos específicos en el efecto de vehículos pesados en la corriente del flujo de tráfico en los descensos. En general, si los descensos no causan que los camiones deban usar cambios bajos, pueden tratarse como si

se encontraran en segmentos de terrenos a nivel, y se seleccionan los factores de equivalencia de los vehículos de pasajeros de acuerdo con sus datos. Donde los descensos más severos pueden ocurrir, los camiones deben usar a menudo los cambios bajos para evitar ganar demasiada velocidad y correr fuera de control. En estos casos, el efecto es mayor que si se encontrara en un terreno a nivel. La Tabla 2.23 da valores de E_T . Para los vehículos recreacionales, los descensos pueden tratarse como si se tratara de terreno a nivel.

Equivalentes para pendientes compuestas

El alineamiento vertical de la mayoría de las autopistas resulta una serie continua de pendientes. A menudo es necesario determinar el efecto de una serie de pendientes significativas en una sucesión. La técnica seguida es realizar el cálculo de la pendiente media en el punto en cuestión. La pendiente media se define como el levantamiento total del principio de la pendiente compuesta dividida entre la longitud de la pendiente.

La pendiente media es un acercamiento aceptable para pendientes en que todas las subdivisiones son menos del 4% de la longitud total de la pendiente compuesta, y ésta tiene menos de 1.200 metros.

Factor de ajuste por la población de conductores

Las características de la corriente de tráfico, que son la base de esta metodología, es representativa de conductores viajeros regulares en la corriente de tráfico en la que la mayoría de los conductores está familiarizado con el medio por el cual circula. Se acepta que las corrientes de tráfico con características diferentes (por ejemplo,

Tabla 2.21
Factor de
ajuste por
pendientes
específicas de
ascenso para
buses y
camiones

Pendiente (%)	Longitud (km)	E _T								
		Porcentaje de buses y camiones								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	Todas	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.4-0.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.8-1.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>1.2-1.6	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>1.6-2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
≥ 2-3	>2.4	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.4-0.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	>0.8-1.2	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>1.2-1.6	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>1.6-2.4	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
> 3-4	>2.4	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.4-0.8	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.8-1.2	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>1.2-1.6	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.6	5.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
> 4-5	0.0-0.4	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.4-0.5	4.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.5-0.8	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>0.8-1.2	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.2-1.6	5.5	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.6	6.0	5.0	5.0	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
> 5-6	0.0-0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>0.4-0.5	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.5-0.8	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.8-1.2	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
	>1.2-1.6	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5
	>1.6	7.0	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0
> 6	0.0-0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>0.4-0.5	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.5-0.8	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.8-1.2	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
	>1.2-1.6	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5
	>1.6	7.0	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

conductores de vehículos recreacionales) reduzcan el uso eficaz de las autopistas. Considerando que los datos y la información varían sustancialmente, se han encontrado capacidades más bajas en fines de

semana, en especial en las áreas recreativas. Puede asumirse que la reducción en la capacidad (Nivel de servicio E) se extiende para servir los volúmenes también para otros niveles de servicio.

Pendiente (%)	Longitud (km)	E_R								
		Porcentaje de Buses y camiones								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	Todas	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
> 2-3	0.0 – 0.8	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	> 0.8	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2
> 3-4	0.0 – 0.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	> 0.4-0.8	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	> 0.8	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5
> 4-5	0.0 – 0.4	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	4.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 0.8	4.5	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0
> 5	0.0 – 0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5
	> 0.4-0.8	6.0	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0
	> 0.8	6.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0

Tabla 2.22
Factor de ajuste por pendientes específicas de ascenso para vehículos recreativos

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

El factor de ajuste, f_p , se usa para reflejar este efecto. Los valores de rango del f_p varían de 0.85 a 1.00. El analista debe seleccionar 1.00, que refleja el tráfico del viajero común (es decir, los usuarios familiares), a menos que haya evidencia suficiente para aplicar un valor más bajo. Cuando se necesita mayor exactitud, se recomienda el estudio del tipo de viajero y el flujo de tráfico recreativo y de velocidades.

Determinación del nivel de servicio

El primer paso para determinar el nivel de servicio de un segmento básico de la autopista es definir y segmentar el medio de la autopista apropiadamente. El segundo, estimar la velocidad a flujo libre por medición o a partir de un valor base, con lo cual se construye una curva de velocidad-flujo apropiada de la misma forma que las curvas típicas presentadas

Pendiente negativa (cuesta abajo)	Longitud (km)	ET			
		Porcentaje de camiones			
		5	10	15	20
< 4	Todas	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	> 6.4	2.0	2.0	2.0	1.5
> 5-6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 5-6	> 6.4	5.5	4.0	4.0	3.0
> 6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 6	> 6.4	7.5	6.0	5.5	4.5

Tabla 2.23
Factor de ajuste por pendientes específicas de descenso para buses y camiones

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

en las curvas velocidad - flujo y niveles de servicio en segmentos básicos de autopista. Basándose en la tasa de flujo, VP, y la curva de velocidad-flujo construida, se lee la velocidad media del automóvil de pasajeros en el eje Y. El próximo paso es calcular la densidad utilizando la Ecuación

$$D = \frac{v_p}{S} \quad 2.15$$

donde

D = densidad [vh/km/carril]

VP = Tasa de flujo [vh/km/carril]

S = Velocidad media de los autos [km/h]

El nivel de servicio del segmento básico de autopista se determina comparando la densidad calculada D con la presentada en la Figura 2.9.

Segmentación de la autopista

Los análisis de capacidad y de niveles de servicio requieren que los segmentos básicos de autopista tengan condiciones uniformes de tráfico y de geometría; por tanto, un cambio en alguna condición causará la terminación de un segmento de análisis.

Varias situaciones presentadas en la autopista a lo largo de los límites naturales generarán los segmentos uniformes, la consideración de rampas de entrada o de salida o cambios en el volumen de tráfico; el principio y el extremo de las pendientes simples o compuestas también actúan como límites. Cualquier punto que el tráfico o la vía condiciona el cambio debe usarse como un límite entre segmentos uniformes, cada uno de los cuales debe analizarse por separado.

Además de los límites naturales creados por las vías de entrada y las de salida, las con-

diciones siguientes permiten identificar el segmento básico de autopista en análisis:

- ♦ Cambio en el número de carriles.
- ♦ Cambio en la distancia libre lateral.
- ♦ Cambio de pendiente en más de un 2% o pendiente constante ascendente en más de 1.200 metros.
- ♦ Cambio en el límite de velocidad.

2.3.4 Rampas de convergencia y divergencia

2.3.4.1 Características físicas y funcionales

Una rampa es una longitud de carretera que proporciona una conexión exclusiva entre dos medios de la carretera. En las autopistas, todas las maniobras de entrada y salida tienen lugar en rampas que se diseñan para facilitar la entrada adecuada de vehículos de la vía en la corriente de tráfico de la autopista, así como la salida de vehículos de la corriente de tráfico de la autopista por la rampa prevista.

Una rampa puede constar de tres elementos geométricos de interés:

- ♦ La unión de la rampa-autopista.
- ♦ La rampa
- ♦ La unión de la rampa-calle.

La rampa-autopista se diseña para permitir la entrada o salida de vehículos a gran velocidad con la ruptura mínima al tráfico adyacente de la autopista. Las características geométricas de uniones de la rampa - autopista varían de acuerdo con la longitud y el tipo (paralelismo o ángulo de entrega) de carriles de aceleración o desaceleración, velocidad a flujo libre, distancias de visibilidad y otros elementos que influyen en la operación de la rampa.

Las características geométricas de las rampas varían de situación a situación. Las rampas pueden variar en el número de carriles (normalmente uno o dos), la velocidad de diseño, las pendientes y la curvatura horizontal. El diseño de rampas raramente es una fuente de dificultad operacional, a menos que un incidente en la corriente del tráfico cause colas. La conexión de la rampa a la calle puede causar la formación de colas de espera a lo largo de la rampa, pero esto no se relaciona con los diseños de la rampa.

Muchas rampas conectan los medios de acceso limitado a las arterias locales y colectoras. Tales rampas involucran un elemento crítico en el diseño global. Las uniones de la rampa a la calle pueden permitir una fusión desenfadada de movimientos de convergencia y divergencia, o pueden llegar a tomar forma de una intersección a nivel. Las colas que se forman en la unión de la rampa a la calle en condiciones extremas pueden incluir la unión rampa-autopista.

Las rampas de convergencia o de divergencia se localizan entre diferentes tipos de vías. En la Figura 2.10 se ilustran ejemplos de rampas de convergencia y de divergencia.

La unión de la rampa a la autopista es un área en que el tráfico exige espacio. La corriente arriba del tráfico compite por el espacio con los vehículos de la vía que entran en una rampa de convergencia. La demanda de la vía de entrada se genera localmente, aunque las calles urbanas pueden traer algunos conductores de orígenes más distantes.

En un área de convergencia, los vehículos individuales intentan encontrar un espacio en el carril del tráfico de la autopista adyacente; en la mayoría de las rampas está en el lado derecho de la autopista. El carril de la autopista en que los vehículos de la vía de entrada buscan el espaciamiento, se designa como carril 1.

Por convención, los carriles de la autopista se numeran de 1 a N, es decir, del hombro derecho al separador.

La acción individual de vehículos que convergen en el carril 1 del flujo de tráfico crea turbulencia en la vecindad de la rampa. Los vehículos próximos a la autopista se desvían hacia la izquierda para evitar esta turbulencia. Según estudios estadounidenses, el efecto operacional de la convergencia tiene mayor influencia en los carriles 1 y 2 y el carril de aceleración para una distancia que se extiende del punto físico de unión a unos 450 metros corriente arriba del punto de convergencia. La Figura 2.11 y la Figura 2.12 presentan las áreas de influencia para las rampas de entrada y salida.

Las interacciones son dinámicas en las áreas de influencia de la rampa. Los vehícu-

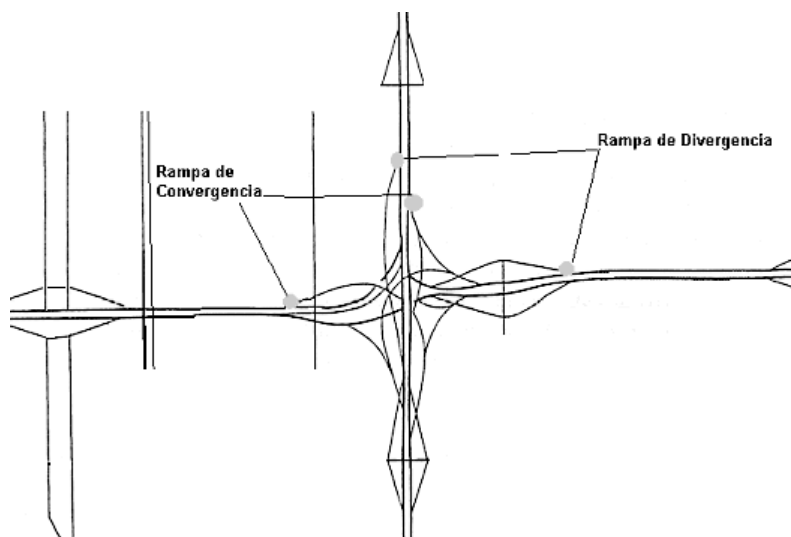
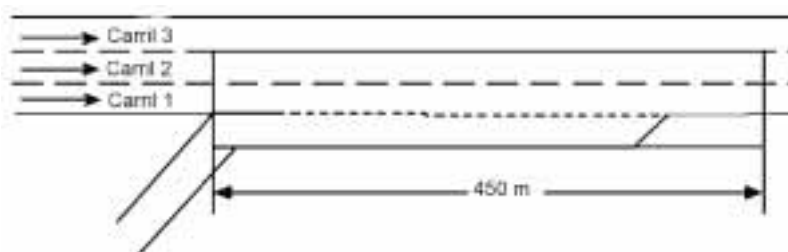


Figura 2.10
Rampas de convergencia y divergencia

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Figura 2.11
Área de
influencia para
rampas de
convergencia

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

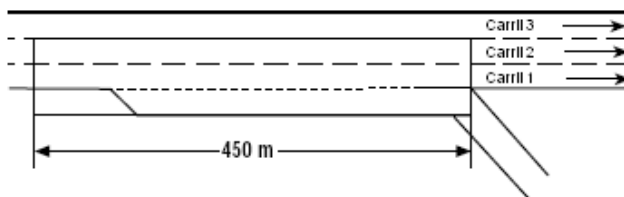


los cercanos a la rampa de la autopista se desplazarán a la izquierda en la medida que su capacidad se los permita. Considerando que la intensidad de flujo de la rampa influye en la conducta de los vehículos de la autopista, la congestión de la autopista generalmente puede actuar para limitar el flujo de la rampa, causando la migración a otros intercambios o rutas.

En las rampas de salida, la maniobra básica es divergir, es decir, una sola corriente de tráfico, que se separa en dos corrientes. Los vehículos de salida deben ocupar la senda adyacente a la salida (carril 1 para una vía de salida a la derecha). Así, cuando la rampa de salida se aproxima, los vehículos divergen al moverse a la derecha. Esto produce una redistribución de otros vehículos de la autopista cuando éstos salen para evitar la turbulencia. El área de mayor turbulencia está conformada por los carriles 1 y 2 en una distancia que se extiende 450 metros corriente arriba del punto de divergencia, como se muestra en la Figura 2.11.

Figura 2.12
Área de
influencia
para rampas
de divergencia

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)



2.3.4.2 Condiciones básicas para el análisis

Algunas variables influyen en el funcionamiento de las uniones entre rampa y autopista. Se deben incluir todas las variables

del funcionamiento del segmento básico de autopista, como ancho de carriles, distancia de visibilidad lateral, tipo de terreno, población de conductores, y presencia de vehículos pesados. Hay parámetros adicionales de importancia particular para el funcionamiento de las rampas, como la longitud de los carriles de aceleración o desaceleración, la velocidad de flujo libre de la rampa, y la distribución del tráfico en el carril de corriente arriba.

La longitud de los carriles de aceleración o desaceleración tiene un efecto significativo en las operaciones de convergencia y divergencia. Los carriles cortos proporcionan oportunidad restringida para acelerar antes de unirse a la corriente de tráfico de la autopista en maniobras de convergencia; de la misma forma, la rampa de divergencia corta genera una oportunidad pequeña de disminuir la velocidad para efectuar la maniobra de cambio de dirección. El resultado es que tanto la aceleración como la desaceleración se

deben asumir dentro de la autopista, afectando el flujo que se presenta. Los carriles cortos de aceleración también influyen en que muchos vehículos reduzcan su velocidad significativamente e incluso pueden llegar a detenerse mientras buscan un espaciamiento apropiado en el primer carril de la corriente de tráfico.

Muchas características influyen en la velocidad de flujo libre de la rampa, incluso el grado de curvatura, el número de carriles, las pendientes y la distancia de visibilidad, entre otros. La velocidad a flujo libre es un factor influyente puesto que determina la velocidad a la que los vehículos convergen y entran en el carril de aceleración, así como la velocidad a la que los vehículos ingresan por la rampa. Esto, a su vez, determina la cantidad de aceleración o desaceleración necesaria. Algunas características básicas que deben tener las rampas de convergencia y divergencia son:

- ◆ Velocidad a flujo libre. Generalmente variable entre 30 y 80 km/h. Aunque la velocidad a flujo libre es mejor determinarla en campo, usualmente se puede tomar un valor de 55 km/h, sobre todo donde no se encuentran disponibles las mediciones específicas o predicciones.
- ◆ Un carril en la rampa. Volúmenes mayores de 1.500 vehículos livianos/hora requerirán un carril adicional.
- ◆ Distribución de los volúmenes de tránsito corriente arriba en los carriles 1 y 2 de la autopista.
- ◆ No contar con rampas adyacentes corriente arriba o corriente abajo.

Las limitaciones para la aplicación de esta metodología se plantean a continuación

- ◆ Carriles especiales. Destinados para la circulación de vehículos de alta ocupación, VAO, como carriles de entrada a la rampa.
- ◆ Longitud de la rampa.
- ◆ Condiciones sobresaturadas.
- ◆ Límites de velocidad y magnitud de entrada.
- ◆ Presencia de sistemas de transporte inteligente.

2.3.4.3 Metodología

En la Figura 2.13 se ilustra la entrada y el orden del método para el análisis de capacidad y niveles de servicio para rampas de convergencia y divergencia.

La metodología se enfoca en el funcionamiento de las uniones de rampa a autopista y en las características propias de la rampa.

Niveles de servicio

Los niveles de servicio en áreas de convergencia y divergencia están determinados por la densidad en condiciones de operación estable, representados de los niveles A hasta E. El nivel de servicio F se presenta cuando el flujo total excede la capacidad del segmento de la autopista y la densidad no está estimada para este caso.

Nivel de servicio A

Representa operaciones sin restricciones. La densidad es baja y permite la maniobra sin causar turbulencias en la corriente del tráfico.

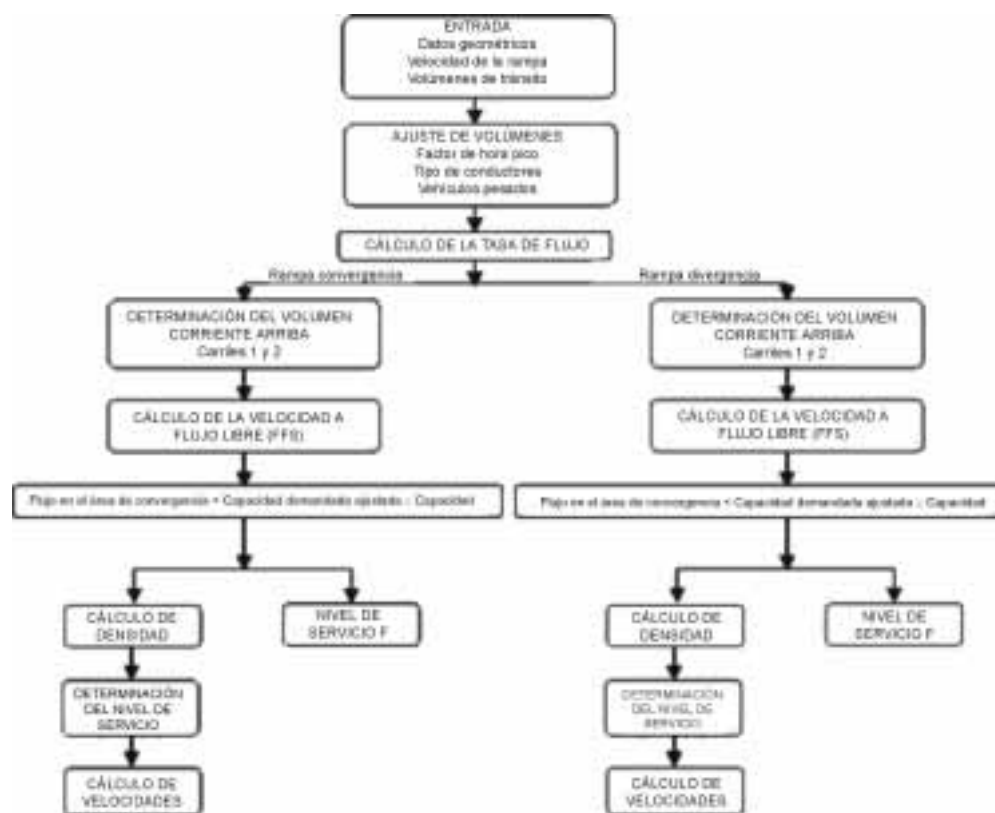
Nivel de servicio B

Las maniobras de convergencia y de divergencia llegan a ser sensibles directamente para los conductores; ocurre una mínima turbulencia. En las rampas de convergencia, los conductores deben ajustar su velocidad para entrar fluidamente en el carril de aceleración y la autopista.

Nivel de servicio C

La velocidad en el área de influencia comienza a disminuir y las turbulencias que se presentan en la corriente del tráfico son noto-

Figura 2.13
Esquema metodológico para el análisis en rampas de convergencia y divergencia



Fuente:
Manual de
capacidad de
carretera
(HCM 2000)

rias. Los vehículos que se presentan en la rampa y en la autopista deben ajustar sus velocidades para entrar fluidamente la corriente del tráfico.

Nivel de servicio D

Los niveles de turbulencia en el área de influencia llegan a ser importantes, provocando que los vehículos disminuyan su velocidad para acomodarse en la convergencia o divergencia. Se pueden formar algunas colas sobre las rampas; sin embargo, la operación seguiría estable en la autopista.

Nivel de servicio E

Representa condiciones de aproximación al régimen de capacidad plena; la velocidad se reduce significativamente y la turbulencia es

sentida por todos los conductores. Pequeños cambios en la demanda del flujo de tráfico causarán colas en la rampa y en la autopista.

Nivel de servicio F

Se presenta cuando la demanda excede la capacidad de la autopista corriente arriba, corriente abajo o en la rampa.

En la Tabla 2.24 se presentan los rangos de la densidad para la determinación del nivel de servicio en rampas de convergencia y divergencia, mientras que en la Tabla 2.25 se presentan los valores aproximados de capacidad para rampas de un carril y de dos carriles.

Determinación de la tasa de flujo

La proporción de flujo en cada hora deberá reflejar la influencia de vehículos pesa-

dos y el cambio temporal de la variación del flujo de tráfico durante una hora, así como las características de la población de conductores o usuarios. Estos efectos se reflejan ajustando los volúmenes de cada hora, que se presentan típicamente en vehículos mixtos por hora (veh/h), para llegar a una tasa de flujo de vehículos equivalente en autos livianos (pasajero, vehículos livianos/h).

La tasa de flujo de vehículos livianos equivalentes es el resultado de calcular el factor de equivalencia del vehículo pesado en vehículos livianos.

La Ecuación que se presenta a continuación se utiliza para calcular la tasa de flujo de vehículos equivalentes.

$$v_i = \frac{V_i}{FHP \times f_{HV} \times f_p} \quad 2.16$$

donde

v_i = tasa de flujo equivalente para el movimiento i en 15 minutos en vehículos [vh livianos/h/carril]

V_i = volumen horario para el movimiento i [vh mixtos/h/sentido]

FHP = factor de hora pico

f_{HV} = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

f_p = factor de ajuste por tipo de conductores

El ajuste de los factores se realiza de manera similar al presentado en el análisis para secciones básicas de autopista correspondiente al numeral anterior.

Cálculo de la capacidad en rampas de convergencia

El modelo de cálculo para la determinación de la capacidad en rampas de convergencia se ilustra en la Figura 2.14.

Niveles de servicio	Densidad (veh liv/km/carril)
A	≤ 6
B	> 6
C	$> 12 - 17$
D	$> 17 - 22$
E	> 22
F	Densidad excede la capacidad

Tabla 2.24
Niveles de servicio en rampas

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Velocidad a flujo libre en rampas, SFR (km/h)	Capacidad (vh/hora)	
	Rampa de un carril	Rampa de dos carriles
> 80	2200	4400
$> 65 - 80$	2100	4100
$> 50 - 65$	2000	3800
$\geq 30 - 50$	1900	3500
< 30	1800	3200

Tabla 2.25
Capacidad aproximada en rampas de uno y dos carriles

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

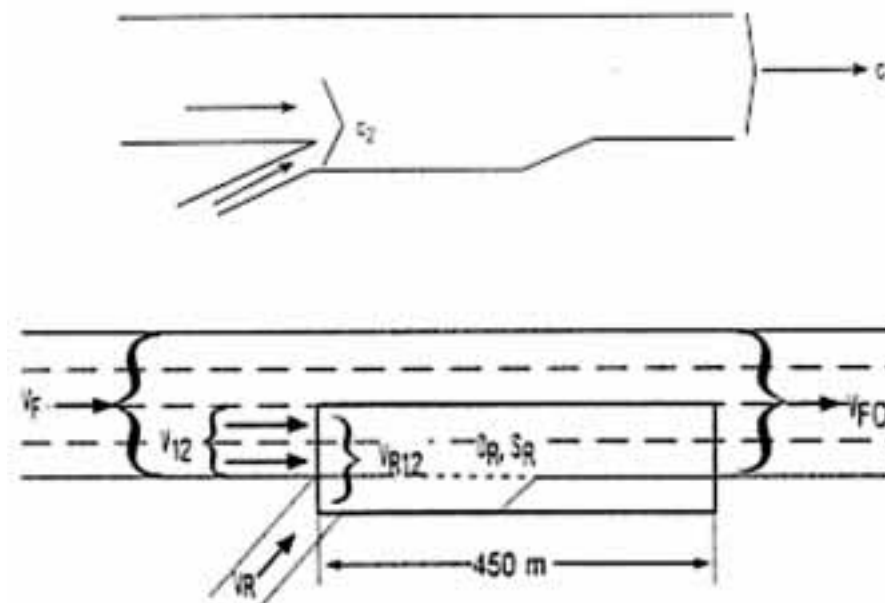
La principal influencia sobre el flujo que se presenta en los carriles 1 y 2 inmediatamente corriente arriba de la rampa de convergencia es función de:

- ♦ El volumen total que se aproxima en la autopista (VF) en veh lv/h.
- ♦ El volumen que se presenta en la rampa (VR) en veh lv/h.
- ♦ Longitud total del carril de aceleración (LA) en metros.
- ♦ Velocidad a flujo libre en la rampa (SFR) en km/h.
- ♦ Volumen de tránsito rampa de entrada corriente arriba (VR) en vh lv/h.
- ♦ Distancia a la rampa adyacente corriente arriba (L_{UP}) en metros.
- ♦ Distancia a la rampa adyacente corriente abajo (L_{DOWN}) en metros.

Volumen en los carriles 1 y 2 de la Autopista, varía de acuerdo con el número de carriles que se presentan en ella, y se calcula así:

$$v_{12} = v_f \times P_{FM} \quad 2.17$$

Figura 2.14
Modelo de
cálculo de
capacidad en
rampas de
convergencia



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Para vías de cuatro carriles (dos por sentido):

$$PFM = 1.000$$

Para vías de seis carriles (tres carriles en cada dirección):

$$P_{FM} = 0.5775 + 0.00002 L_A \quad \mathbf{2.18}$$

$$P_{FM} = 0.7289 + 0.0000135 (V_F + V_R) - 0.002048 S_{FR} + 0.0002 L_{up} \quad \mathbf{2.19}$$

$$P_{FM} = 0.5487 + 0.0801 v_D / L_{down} \quad \mathbf{2.20}$$

Para vías de ocho carriles (cuatro por cada dirección):

$$P_{FM} = 0.2178 + 0.000125 V_R + 0.05887 L_A / S_{FR} \quad \mathbf{2.21}$$

Se presentan 3 ecuaciones para determinar la proporción de vehículos en los carriles 1 y 2 de la autopista; en la Tabla 2.26, se presenta la selección de las ecuaciones de cálculo.

Determinación de la capacidad en rampas de convergencia

La capacidad de la convergencia se determina por la capacidad del segmento de autopista corriente abajo. Así, el total del flujo corriente arriba de la autopista y de la rampa

Tabla 2.26
Selección de
la ecuación
para
autopistas de
seis carriles

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Corriente arriba de la rampa	En la rampa	Corriente abajo de la rampa	Ecuación a usar
-	Sí	-	Ecuación 2.18
-	Sí	Sí	Ecuación 2.18
-	Sí	No	Ecuación 2.18 o Ecuación 2.20
Sí	Sí	-	Ecuación 2.18
No	Sí	-	Ecuación 2.18 o Ecuación 2.19
Sí	Sí	Sí	Ecuación 2.18
Sí	Sí	No	Ecuación 2.18 o Ecuación 2.20
No	Sí	Sí	Ecuación 2.18 o Ecuación 2.19
No	Sí	No	Ecuación 2.18, Ecuación 2.19 o Ecuación 2.20

no puede exceder la capacidad del segmento básico de autopista que partirá corriente abajo. Para la rampa de convergencia, el volumen será:

$$V_{R12} = V_{12} + V_R \quad 2.22$$

donde

V_{R12} = volumen total en el área de influencia de la rampa de convergencia [veh. livianos/h]

V_{12} = volumen en los carriles 1 y 2 de la autopista corriente arriba [veh. livianos/h]

V_R = volumen en la rampa de convergencia [veh. livianos/h]

La capacidad total del segmento de autopista corriente abajo ($V_{FO} = V_F + V_R$) y el máximo valor del flujo que se encuentra en el área de influencia (V_{R12}) deben estar dentro de los límites que se presentan en la Tabla 2.27.

Determinación del nivel de servicio para rampas de convergencia

El criterio que establece el nivel de servicio se basa en la densidad del área de influencia, la cual tiene en cuenta las siguientes variables:

- ◆ Densidad en el área de influencia en vehículos livianos/km/carril.

- ◆ Volumen de tránsito en la rampa de entrada (V_R) en veh. livianos/h.
- ◆ Volumen de tránsito en el área de influencia (V_{12}) en veh. livianos/h.
- ◆ Longitud del carril de aceleración (L_A) en metros.

Las mencionadas variables, se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$D_R = 3.402 + 0.00456v_R + 0.0048v_{12} - 0.01278L_A \quad 2.23$$

donde

D_R = densidad en el área de influencia de la convergencia [veh. livianos/km/carril]

v_R = tasa de flujo que converge por la rampa [veh. livianos/h]

v_{12} = tasa de flujo entrando al área de influencia de la rampa [veh. livianos/h]

L_A = longitud del carril de aceleración [m]

Determinación de volúmenes corriente arriba en rampas de divergencia

Las principales influencias en el flujo de los carriles 1 y 2 inmediatamente corriente arriba de la rampa de divergencia (incluido el carril de desaceleración), son:

Velocidad a flujo libre (km/h)	Máximo flujo corriente abajo, v (veh./h)				Máximo flujo deseable entrando en el área de influencia, V _{R12} (veh./h)
	Número de carriles en una dirección				
	2	3	4	> 4	
120	4800	7200	9600	2400/carril	4600
110	4700	7050	9400	2350/carril	4600
100	4600	6900	9200	2300/carril	4600
90	4500	6750	9000	2250/carril	4600

Tabla 2.27
Capacidad máxima para rampas de convergencia

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

- ◆ El volumen total que se aproxima en la autopista (V_F) en vehículos livianos/h.
- ◆ El volumen que se presenta en la rampa (V_R) en vehículos livianos/h.
- ◆ Volumen de tránsito en rampa corriente arriba (V_U) en vehículos livianos/h.
- ◆ Volumen de tránsito en rampa corriente abajo (V_D) en vehículos livianos/h.
- ◆ Distancia a la rampa adyacente corriente arriba (L_{UP}) en metros.
- ◆ Distancia a la rampa adyacente corriente abajo (L_{DOWN}) en metros.

La determinación del volumen en los carriles 1 y 2 de la autopista varía de acuerdo con el número de carriles de la autopista, según se presenta a continuación.

$$V_{R12} = V_R + (V_F - V_R)P_{FD} \quad 2.24$$

donde

V_{R12} = volumen total en el área de influencia de la rampa de divergencia [veh. livianos/h]

V_{12} = volumen en los carriles 1 y 2 de la autopista corriente arriba [veh. livianos/h]

V_R = volumen en la rampa de divergencia [veh. livianos/h]

Para vías de cuatro carriles (dos por sentido):

$$PFM = 1.000$$

Para vías de seis carriles (tres carriles en cada dirección):

$$P_{FD} = 0.760 - 0.000025v_F - 0.000046v_R \quad 2.25$$

$$P_{FD} = 0.717 - 0.000039v_F - 0.184v_U / L_{up} \quad 2.26$$

$$P_{FD} = 0.616 - 0.000021v_F - 0.038v_D / L_{down} \quad 2.27$$

Para vías de ocho carriles (cuatro por cada dirección):

$$P_{FD} = 0.436 \quad 2.28$$

Se presenta un total de 3 ecuaciones para determinar la proporción de vehículos en los carriles 1 y 2 de la autopista. A continuación, en la Tabla 2.28, se presenta la selección de las ecuaciones de cálculo.

Determinación de la capacidad en rampas de divergencia

La capacidad de la divergencia está determinada por el volumen que puede salir de la divergencia y por el máximo volumen que puede entrar en los carriles 1 y 2 en el carril de desaceleración. En una rampa divergente, el flujo total que puede divergir está limitado

Tabla 2.28
Selección de la ecuación para autopistas de seis carriles

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Corriente arriba de la rampa	En la rampa	Corriente abajo de la rampa	Ecuación a usar
-	No	-	Ecuación 2.25
-	No	Sí	Ecuación 2.25
-	No	No	Ecuación 2.25 ó Ecuación 2.27
Sí	No	-	Ecuación 2.25 ó Ecuación 2.26
No	No	-	Ecuación 2.25
Sí	No	Sí	Ecuación 2.25 ó Ecuación 2.26
Sí	No	No	Ecuación 2.25, Ecuación 2.26 ó Ecuación 2.27
No	No	Sí	Ecuación 2.25
No	No	No	Ecuación 2.25 ó Ecuación 2.27

por la capacidad de los carriles de la autopista que se aproximan a la divergencia.

En la Tabla 2.29 se presenta la capacidad total del segmento de autopista corriente arriba (V_F) y el máximo valor del flujo que se encuentra en los carriles del área de influencia (V_{12}).

Determinación del nivel de servicio para rampas de divergencia

El criterio que establece el nivel de servicio se basa en la densidad en el área de influencia, la cual tiene en cuenta las siguientes variables:

- ◆ Densidad en el área de influencia en vehículos livianos/km/carril.
- ◆ Volumen de tránsito en el área de influencia en vehículos livianos/h.
- ◆ Longitud del carril de desaceleración en metros.

Las mencionadas variables, se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$D_R = 2.642 + 0.0053v_{12} - 0.0183L_D \quad \mathbf{2.29}$$

donde

D_R = densidad en el área de influencia de la divergencia [veh. livianos/km/carril]

v_{12} = tasa de flujo entrando al área de influencia de la rampa [veh. livianos/h]

L_D = longitud del carril de desaceleración [m]

Determinación de la velocidad en el área de influencia de las rampas

Para determinar el nivel de servicio en conjunto de la operación en segmentos largos, es necesario predecir la velocidad media en los segmentos largos dentro del área de influencia de la rampa y en los carriles adyacentes (carriles 3 y 4, si existen) y en los 450 metros de influencia de la rampa. Se estima entonces la velocidad media en los vehículos de todos los carriles de la autopista, teniendo en cuenta:

- ◆ Velocidad media de los vehículos que viajan en los carriles 3 y 4, si existen, en los 450 metros de longitud del área de influencia (S_O), en km/h.
- ◆ Velocidad a flujo libre de la autopista en la aproximación al área de convergencia o de divergencia (S_{FF}) en km/h.
- ◆ Velocidad a flujo libre de la rampa (S_{FR}) en km/h.
- ◆ Longitud del carril de aceleración (L_A) en metros.
- ◆ Volumen de tránsito en la rampa (V_R) en vehículos livianos/h.
- ◆ Volumen de tránsito en la zona de convergencia (V_{R12}) en vehículos livianos/h.

Velocidad a flujo libre (km/h)	Máximo flujo corriente abajo, v_{FI} (vh/h)				Máximo flujo entrando en el área de influencia, V_{12} (vh/h)
	Número de carriles en una dirección				
	2	3	4	> 4	
120	4800	7200	9600	2400/carril	4400
110	4700	7050	9400	2350/carril	4400
100	4600	6900	9200	2300/carril	4400
90	4500	6750	9000	2250/carril	4400

Tabla 2.29
Capacidad máxima para rampas de divergencia

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

- ♦ Volumen de tránsito por carril en los demás carriles (3 y 4, si existen) al inicio de la rampa (V_{OA}) en vehículos livianos/h/carril.
- ♦ Determinación intermedia de velocidades para convergencia (M_s) y divergencia (D_s)

Estas variables se relacionan a continuación:

Área de convergencia

Velocidad media en el área de influencia de la rampa (km/h):

$$S_R = S_{FF} - (S_{FF} - 67) M_s$$

$$M_s = 0.321 + 0.0039e^{v_{R12}/1000} - 0.004(L_A S_{FR} / 1000) \quad \mathbf{2.30}$$

Velocidad media fuera de los carriles del área de influencia de la rampa:

$$S_o = S_{FF}$$

donde $v_{OA} < 500 \text{vh/h}$

$$S_o = S_{FF} - 0.0058(V_{OA} - 500) \quad \mathbf{2.31}$$

donde $v_{OA} = 500$ hasta 2300vh/h

$$S_o = S_{FF} - 10.52 - 0.0(v_{OA} - 2300)$$

Área de divergencia

Velocidad media en el área de influencia de la rampa (km/h):

$$S_R = S_{FF} - (S_{FF} - 67) D_s \quad \mathbf{2.32}$$

$$D_s = 0.883 + 0.00009V_R - 0.008S_{FR}$$

Velocidad media fuera de los carriles del área de influencia de la rampa:

$$S_o = 1.06S_{FF}$$

donde $v_{OA} < 1000 \text{vh/h}$

$$S_o = 1.06S_{FF} - 0.0062(V_{OA} - 1000) \quad \mathbf{2.33}$$

donde $v_{OA} \geq 1000 \text{vh/h}$

En nuestro medio, se han estimado los valores de las longitudes para el carril de cambio de velocidad (Tabla 2.30 y Tabla 2.31), como las longitudes de las transiciones (o cuñas) para pendientes de 2% o menores. Para carriles de desaceleración, la longitud debe reducirse al 80% o al 90% para pendientes del 3% al 4% y 5% al 6%, respectivamente, y aumentarse al 120% y 130%, si existen pendientes de las inclinaciones antes mencionadas.

También se presentan aquí las longitudes de los carriles de almacenamiento considerados por el Ministerio de Transporte.

2.3.5 Tramos de entrecruzamiento

2.3.5.1 Características físicas y funcionales

El entrecruzamiento se define como el cruce de dos o más corrientes del tráfico

Tabla 2.30
Longitudes recomendables para carriles de desaceleración

Fuente:
Manual de Diseño Geométrico para Carreteras. Instituto Nacional de Vías.

Carriles de desaceleración								
Velocidad específica del ramal de giro (km/h)	PARE	25	30	40	50	60	80	
Radio mínimo de la curva (m)	-	15	25	45	75	120	250	
Velocidad de diseño de la carretera (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de desaceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	70	50	45	45	-	-	-
60	55	90	70	70	55	55	-	-
70	60	105	90	90	75	60	60	-
80	65	120	105	105	90	75	65	-
100	75	140	125	125	110	95	80	75
120	90	160	145	130	130	130	110	90

Carriles de aceleración								
I - Vías con gran intensidad de tránsito								
Velocidad de diseño de la carretera (km/h)	Longitud de la transición (m)	Longitud total del carril de aceleración, incluyendo la transición (m)						
50	45	90	70	55	45	-	-	-
60	55	140	120	105	90	55	-	-
70	60	185	165	150	135	100	60	-
80	65	235	215	200	185	150	105	-
100	75	340	320	305	290	255	210	105
120	90	435	425	410	390	360	300	210
II - Otras vías								
50	45	55	45	45	45	-	-	-
60	55	90	75	65	55	55	-	-
70	60	125	110	90	75	60	60	-
80	65	165	150	130	110	85	65	-
100	75	255	235	220	200	170	120	75
120	90	340	320	300	275	250	195	100

Tabla 2.31
Longitudes recomendables para carriles de aceleración

Fuente: Manual de diseño geométrico para carreteras. Instituto Nacional de Vías.

Vehículos / hora que giran	30	60	100	200	300
Longitud en metros	8	15	36	60	75

Tabla 2.32
Longitudes de carriles de almacenamiento

Fuente: Manual de diseño geométrico para carreteras. Instituto Nacional de Vías.

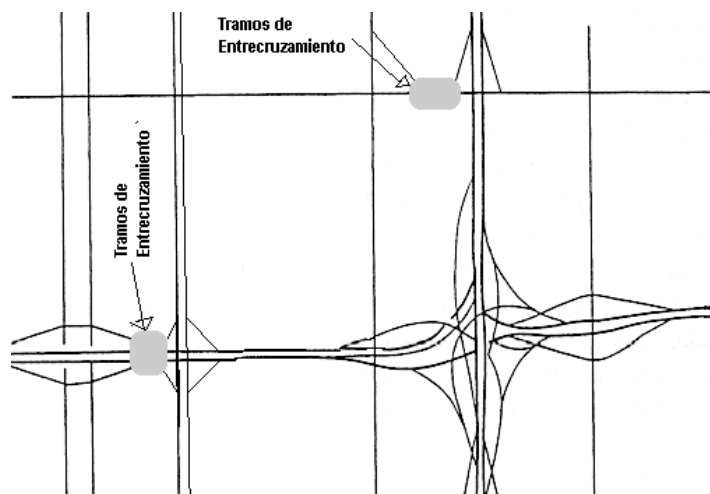
que viajan generalmente en la misma dirección a lo largo de una longitud significativa de vía sin la ayuda de dispositivos de control del tráfico (con excepción de señales de guía). Los tramos de entrecruzamiento se forman cuando un área de convergencia es seguida por una de divergencia, o cuando una rampa de convergencia es seguida por una rampa de salida y los dos se unen por un carril auxiliar. Es de notar que si una vía de entrada es seguida por una vía de salida de un carril y los dos no se conectan por un carril, los movimientos de convergencia y de divergencia se analizan por separado mediante los procedimientos usados en el análisis de rampas de convergencia y divergencia.

Los segmentos de entrecruzamiento requieren intensas maniobras de cambios de carril, en los cuales los conductores deben acceder a los carriles de salida deseados. Luego el tráfico en el tramo de entrecruzamiento está sujeto a la turbulencia excesiva que normalmente se presenta en los segmentos básicos de autopista.

En cuanto a la identificación general de los entrecruzamientos, en la Figura 2.16 se observa que los vehículos que viajan del ramal A al ramal D deben cruzar el camino de vehículos que viajan del ramal B al C. Los flujos A-D y B-C son, por consiguiente, los flujos de entrecruzamiento. Los flujos A-C y B-D también pueden existir, pero ellos no necesitan cruzar la trayectoria de otros flu-

Figura 2.15
Tramos de
entrecruza-
mientos

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)



jos; por tanto, se describen como flujos sin entrecruzamiento.

Los tramos de entrecruzamiento se pueden presentar en cualquier tipo de infraestructura: autopistas, vías multicarriles, vías de dos carriles, arterias urbanas o vías colectoras o distribuidoras. Son tres las variables geométricas que influyen en el funcionamiento de los tramos de entrecruzamiento: la configuración, la longitud y el ancho.

El aspecto más crítico de funcionamiento dentro de un segmento de entrecruzamiento es el cambio de carriles de los vehículos que se cruzan. Los vehículos que se entrecruzan, al cruzar una vía al lado derecho, y que deben salir al lado izquierdo o viceversa, deben ejecutar esta maniobra haciendo los cambios de carril apropiados. La configuración del segmento de entrecruzamiento (es decir, la colo-

cación relativa de los carriles de entrada y salida) tiene un efecto mayor en el número de cambios de carril requeridos por el vehículo para completar su maniobra. Se deben distinguir los cambios de carril entre el entrecruzamiento y los cambios de carril adicionales, que son discretos (es decir, no es necesario completar la maniobra de entrecruzamiento). Lo anterior debe tener lugar dentro de la longitud confinada del segmento de entrecruzamiento,

considerando que el último no se restringe al propio segmento de entrecruzamiento.

Los entrecruzamientos se clasifican en tres tipos.

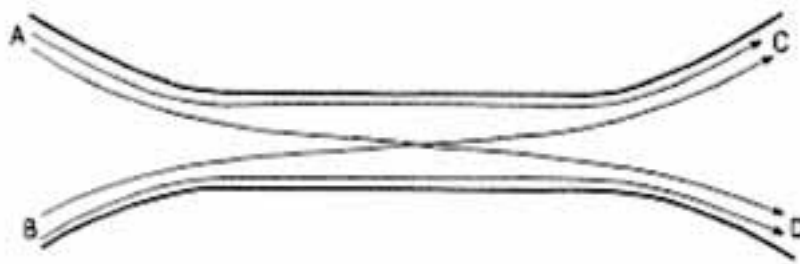
Entrecruzamiento tipo A

La Figura 2.17 presenta los dos tipos de subcategorías de tramos de entrecruzamiento tipo A. La característica de un tramo de entrecruzamiento tipo A es que los vehículos deben cambiar un carril para completar la maniobra satisfactoriamente. Todos los cambios de carril ocurren por una línea del carril que conecta directamente desde el área de entrada al área de salida. Esta línea se llama de corona. Los tramos de entrecruzamiento tipo A son los únicos tramos que tienen una línea en la parte central (corona).

La forma más común de los tramos de entrecruzamiento corresponde al tipo A (Figura 2.17 (a)). El segmento se forma por una ram-

Figura 2.16
Tramos de
entrecruzamientos

Fuente:
Manual de capacidad de
carreteras
(HCM 2000).



pa de entrada seguida de una rampa de salida, conectadas ambas por un carril auxiliar continuo. La línea que se presenta entre el carril auxiliar y el carril derecho de la autopista se denomina la corona del segmento de entrecruzamiento. Los vehículos que entran en la autopista deben hacer un cambio de carril desde el auxiliar a la berma de la autopista y al carril derecho de ésta. De la misma forma, los vehículos que salen de la autopista deben hacer un cambio de carril desde el carril derecho de la autopista al carril auxiliar. Este tipo de configuración también se denomina entrecruzamiento de rampa.

La Figura 2.17 (b) ilustra un segmento de entrecruzamiento mayor que también tiene una línea de corona. Un segmento de entrecruzamiento mayor se forma cuando tres o cuatro tramos de entrada y salida tienen carriles múltiples. Como en el caso de un entrecruzamiento de rampa, los vehículos de entrecruzamiento, sin tener en cuenta la dirección del entrecruzamiento, deben ejecutar un cambio de carril por la línea de la corona del tramo.

Los dos segmentos difieren principalmente en el efecto geométrico de la rampa en la velocidad. Para más tramos de entrecruzamiento de rampa, la velocidad de diseño de las rampas es significativamente menor que la velocidad de diseño de la autopista. Así, en la entrada o salida, los vehículos deben acelerar o desacelerar cuando atraviesan el segmento de entrecruzamiento de la autopista. Para los tramos de entre-

cruzamiento mayor, los tramos de entrada y de salida a menudo tienen velocidades de diseño similares a la autopista, y no se requiere aceleración ni desaceleración.

Los vehículos que se entrecruzan en una configuración tipo A deben ejecutar un cambio de carril por la corona, mientras que los vehículos de entrecruzamiento generalmente se confinan para ocupar los dos carriles adyacentes a la línea de corona. Algunos vehículos del tramo sin entrecruzamiento compartirán estos carriles. Esto limitará el número de carriles que los vehículos pueden ocupar, especialmente en el entrecruzamiento.

En una configuración típica de entrecruzamiento tipo A, todos los vehículos de la rampa están entrecruzándose (es decir, hay flujo bajo de rampa a rampa). Así, los vehículos que se entrecruzan ocupan totalmente el carril auxiliar. Sin embargo, el carril de la autopista es compartido por el entrecruzamiento y por vehículos que no se entrecruzan. Los estudios raramente han mostrado que los vehículos que se entrecruzan ocupan más de

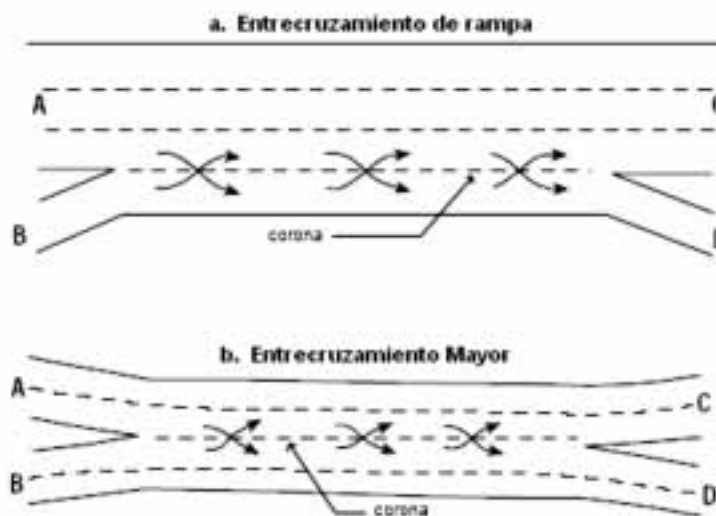


Figura 2.17
Tramos de entrecruzamiento Tipo A

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

1.4 carriles de una configuración tipo A (Figura 2.18).

Entrecruzamientos tipo B

En la Figura 2.19, se presentan los entrecruzamientos tipo B. Los tramos de entrecruzamiento tipo B se encuentran en la categoría de segmentos de entrecruzamientos mayores. Así los segmentos siempre tienen por lo menos tres tramos de entrada y de salida con carriles múltiples (salvo algunas configuraciones de distribuidores o colectores).

Una vez más, es el cambio de carriles requerido por los vehículos que deben entrecruzarse, particularmente, para la configuración tipo B:

- ♦ Un movimiento de entrecruzamiento puede hacerse sin cambio de carril.
- ♦ El otro movimiento de entrecruzamiento requiere a lo sumo un cambio de carril.

La Figura 2.19 (a) y (b) presenta dos tramos de entrecruzamiento tipo B. En ambos casos, el movimiento B-C (la entrada en el derecho, salida en la izquierda) puede hacerse sin ejecutar cambio de carril, considerando que el movimiento A-D (la entrada en la izquierda, salida en el derecho) requiere sólo un cambio de carril. Hay un carril continuo que permite la entrada de la derecha y salida en la izquierda, especialmente. En la Figura 2.19 (a), esto se cumple proporcionando un

carril que diverge. De este carril, un vehículo puede proceder debajo de cualquier tramo de salida, sin ejecutar un cambio de carril. Este tipo de diseño también se llama equilibrio de carril, es decir, el número de carriles que salen de la divergencia es uno más del número de carriles del número que se aproximan.

En la Figura 2.19 (b) se muestra el mismo escenario de un carril cambiante, con un carril desde el tramo A y un carril del tramo B a la entrada. Esto es ligeramente menos eficiente que proporcionar el equilibrio del carril de la salida, pero produce números similares de cambios de carril en el entrecruzamiento de los vehículos.

La configuración mostrada en la Figura 2.19 (c) es única. En ambos casos, hay un carril a la entrada y equilibrio, así como a la salida. En este caso, ambos movimientos de entrecruzamiento pueden tener lugar sin cambiar de carril. Estas configuraciones se encuentran más a menudo en las vías colectoras-distribuidoras, como parte de un intercambio.

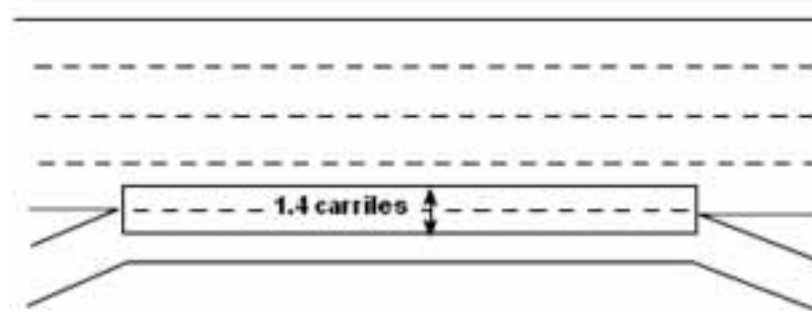
Los entrecruzamientos tipo B son sumamente eficaces para los flujos grandes de entrecruzamiento, principalmente porque proporcionan un carril por los entrecruzamientos. Éstos también pueden hacerse con un solo cambio de carril en ambos carriles adyacentes. Así, el entrecruzamiento de los vehículos puede ocupar un número sustancial de carriles en el segmento de entrecruzamiento y no

pueden ser tan restringidos como en los tramos de entrecruzamiento tipo A.

Las configuraciones de tramos de entrecruzamiento tipo B son más flexibles. Siempre hay un carril

Figura 2.18
Máximo
número de
carriles por
vehículo -
entrecruzamientos
Tipo A

Fuente:
Manual de
Capacidad de
Carreteras (HCM
2000)



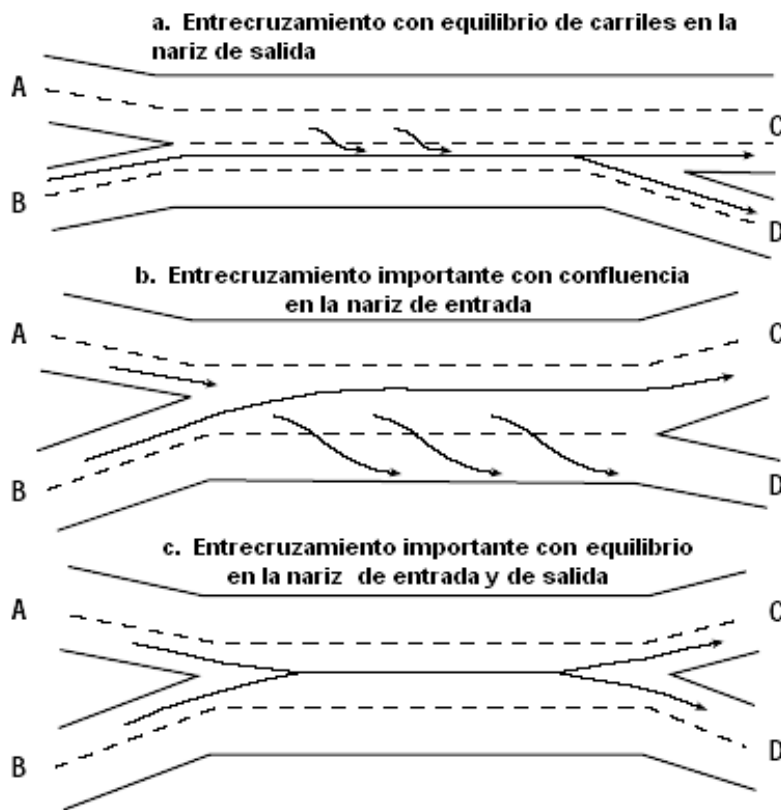


Figura 2.19
Tramos de entrecruzamiento Tipo B

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

para realizar el entrecruzamiento. Además, los dos carriles adyacentes al carril de paso pueden usarse en el entrecruzamiento de los vehículos. También pueden usarse los próximos carriles adyacentes. Los estudios han mostrado que los vehículos que se entrecruzan pueden ocupar hasta 3.5 carriles en una configuración tipo B (Figura 2.20).

requieren, mínimo, dos cambios de carril para realizar con éxito la maniobra. Un entrecruzamiento tipo C se caracteriza por:

- ♦ Un movimiento de entrecruzamiento puede realizarse sin hacer cambio de carril.
- ♦ El otro movimiento de entrecruzamiento requiere dos o más cambios de carril.

Entrecruzamientos tipo C

Los entrecruzamientos tipo C son similares a los entrecruzamientos tipo B, en que se mantienen uno o más carriles para realizar las maniobras de entrecruzamiento. La característica de un entrecruzamiento tipo C es que se

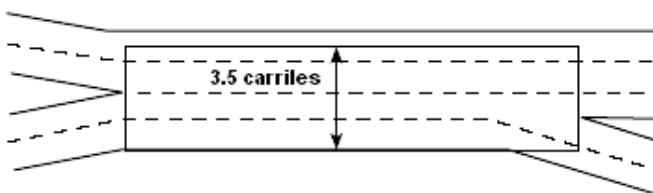


Figura 2.20
Máximo número de carriles por vehículo - entrecruzamientos Tipo B

Fuente: *Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)*

La Figura 2.21 presenta dos tipos de entrecruzamiento tipo C. En la Figura 2.21 (a), el movimiento B-C no requiere un cambio de carril, mientras que el movimiento A-D requiere dos cambios de carril. Este tipo de segmento se forma cuando los carriles de la entrada en equilibrio no unen a los carriles de salida, y no existe ninguna línea de corona. Aunque el segmento es relativamente eficaz para entrecruzar los movimientos en la dirección del flujo de la autopista, no puede ocuparse eficazmente de flujos grandes de entrecruzamiento en la otra dirección.

La Figura 2.21 (b) muestra un tramo de entrecruzamiento de dos lados. Este se forma cuando una vía de entrada a mano derecha es seguida por una vía de salida a mano izquierda, o viceversa. En estos casos, el flujo de la autopista opera funcionalmente como un flujo de entrecruzamiento. Los vehículos de la autopista deben cruzar todos los carriles de ésta para ejecutar la maniobra deseada. Los carriles de la autopista son, en efecto, carriles de entrecruzamiento de los vehículos de la rampa. Los vehículos deben hacer cruces múltiples cuando cruzan de un lado de la autopista al otro.

Las configuraciones tipo C son algo más restrictivas que las configuraciones tipo B, particularmente para el movimiento que requiere dos o más cambios de carril. Los vehículos que se entrecruzan pueden ocupar los carriles en porciones sustanciales y adyacentes al carril en que se desplaza. El uso parcial de otros carriles, sin embargo, es usualmente restringido. Los estudios indican que el límite práctico en el uso de carriles en la maniobra de entrecruzamiento tipo C es 3 (Figura 2.22).

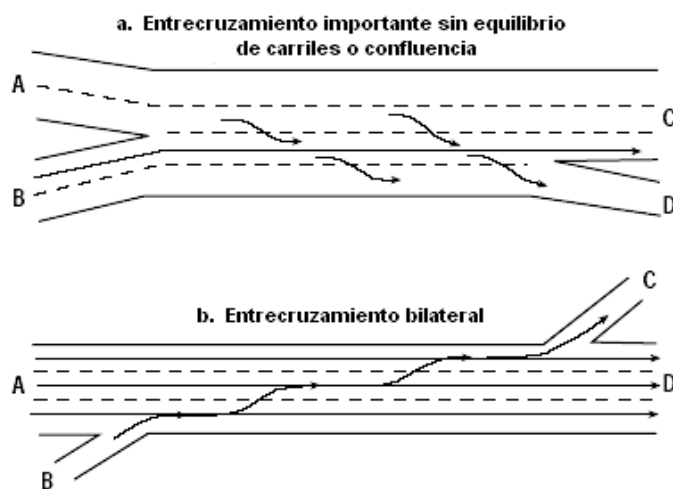
2.3.5.2 Condiciones básicas para el análisis

La configuración de tramos de entrecruzamiento tiene un marcado efecto en el funcionamiento, porque depende de la conducta cambiante de los conductores.

Se han establecido modelos y algoritmos que se codifican, de acuerdo con el tipo de configuración, con parámetros que dependen específicamente de dichas configuraciones. Por tanto, para un número dado de carriles y de longitud del tramo de entrecruzamiento, los modelos predicen las características de operación de las diferentes configuraciones.

La configuración tiene un efecto extenso en el uso proporcional de los carriles por el entrecruzamiento y de los vehículos que no se entrecruzan. Si los vehículos que se entrecruzan ocupan carriles específicos de manera eficiente, la configuración puede limitar la habilidad de entrecruzarse para usar carriles exteriores del tramo de entrecruzamiento. Este efecto se presenta en entrecruzamientos tipo A, porque a

Figura 2.21
Entrecruzamiento tipo C



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

medida que se entrecruzan los vehículos se ocupan los dos carriles adyacentes a la línea de la corona. Es menos severo para la configuración de tramos de entrecruzamiento tipo B, ya que éstos requieren menos cambios de carril para completar las maniobras; así se tiene mayor flexibilidad en el uso de carriles.

La metodología no se aplica en los siguientes casos:

- ◆ Carriles especiales: carriles de vehículos de alta ocupación, en el segmento de entrecruzamiento.
- ◆ Rampas de entrada que forman parte del tramo de entrecruzamiento.
- ◆ Condiciones de operación específicas: el caso de flujo sobresaturado.
- ◆ Efectos de límites de velocidad o intervención de agentes de tránsito.
- ◆ Efectos de tecnologías de sistema de transporte inteligentes.
- ◆ Tramos de entrecruzamiento en las vías colectoras o distribuidoras.
- ◆ Tramos de entrecruzamiento en vías urbanas.
- ◆ Tramos de entrecruzamiento múltiples.

Para el análisis, los tramos de entrecruzamiento múltiples deben dividirse en apropiadas convergencias, divergencias y segmentos simples de entrecruzamiento.

2.3.5.3 Metodología

La metodología se enfoca en el funcionamiento de cinco componentes distintos:

Modelos que predicen la velocidad media de las maniobras de entrecruzamiento, así como de los vehículos que no cambian de carril en el segmento del entrecruzamiento (se especifican modelos para cada tipo de la configuración y para todos los movimientos siendo éstos restringidos o no).

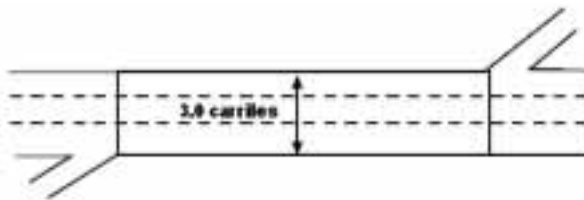


Figura 2.22
Máximo número de carriles por vehículo - entrecruzamientos tipo C

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Modelos que describen el uso proporcional de vehículos en carriles de entrecruzamiento y carriles sin entrecruzamiento determinando, y si el funcionamiento es o no restringido.

Un algoritmo que convierte las velocidades preestablecidas en densidad media en el tramo del entrecruzamiento.

Definición del nivel de servicio basado en el criterio de la densidad en el tramo de entrecruzamiento. Finalmente, un modelo para determinar la capacidad de un tramo de entrecruzamiento.

La entrada y el orden del método de cálculo para tramos de entrecruzamientos esquematiza en la Figura 2.23.

Niveles de servicio

Los niveles de servicio en tramos de entrecruzamiento se determinan por la densidad en condiciones de operación estable, representados en los niveles A hasta F. El nivel de servicio F se presenta cuando el flujo total excede la capacidad del segmento de la autopista y no se estima la densidad.

Nivel de servicio A

Representa operaciones sin restricciones. La densidad es baja y permite la entrada fluida de los vehículos sin causar turbulencias en la corriente del tráfico.

Nivel de servicio B

Las maniobras de convergencia y de divergencia llegan a ser sensibles directamente

Figura 2.23
Metodología
para el análisis
de tramos de
entrecruzamiento



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

para los conductores; ocurre una mínima turbulencia; los conductores deben ajustar su velocidad para entrar fluidamente en la autopista.

Nivel de servicio C

La velocidad en el área de influencia comienza a disminuir y las turbulencias que se presentan en la corriente del tráfico son no-

tables. Los vehículos que se presentan en el tramo de entrecruzamiento y en la vía deben ajustar sus velocidades para entrar fluidamente en la corriente del tráfico.

Nivel de servicio D

Los niveles de turbulencia en el área de influencia llegan a ser importantes, provocando que los vehículos disminuyan su velocidad

para acomodarse en el entrecruzamiento. Se pueden formar algunas colas en las vías; sin embargo, la operación seguiría estable en la autopista.

Nivel de servicio E

Representa condiciones de aproximación a régimen de capacidad; la velocidad se reduce significativamente y la turbulencia es sentida por todos los conductores. Pequeños cambios en la demanda del flujo de tráfico causarán colas en el tramo de entrecruzamiento y en la autopista.

Nivel de servicio F

Refleja densidades un poco menores que las identificadas para segmentos básicos de autopistas y de vías multicarriles. La turbulencia adicional en los tramos de entrecruzamiento entorpece la corriente del tráfico, que fluye a densidades algo más bajas que en los segmentos básicos de autopista y de vías multicarriles.

En la Tabla 2.33, se presentan los rangos de densidad para la determinación del nivel de servicio en tramos de entrecruzamiento.

Determinación de la tasa de flujo

La proporción de flujo en cada hora deberá reflejar la influencia de vehículos pesados y el cambio temporal de la variación del flujo de tráfico durante una hora, así como las características de la población de conductores o usuarios. Estos efectos se reflejan ajustando los volúmenes de cada hora, que se presentan típicamente en vehículos mixtos por hora (veh/h), para llegar a una tasa de flujo de vehículos equivalente en autos livianos (vehículos livianos/h). La tasa de flujo de vehículos de pasajeros equivalente es el re-

sultado de calcular el factor de equivalencia del vehículo pesado en vehículos livianos. El ajuste de la variación del flujo de tráfico en la hora pico se presenta en la sección siguiente. Los resultados de la tasa de flujo equivalente se presenta en vehículos livianos/h/carril. La Ecuación que se presenta a continuación se utiliza para calcular la tasa de flujo de vehículos equivalentes.

$$v = \frac{V}{FHP \times f_{HV} \times f_p} \quad 2.34$$

donde

v = tasa de flujo equivalente para 15 minutos en vehículos [veh. livianos/h/carril]

V = volumen horario [veh. mixtos/h/sentido]

F_{HP} = factor de hora pico

f_{HV} = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

f_p = factor de ajuste por tipo de conductores

Nivel de servicio	Densidad (veh./km/carril)	
	Tramo de entrecruzamiento	Multicarril y colector distribuidor en tramos de entrecruzamiento
A	≤ 6.0	≤ 8.0
B	> 6.0-12.0	> 8.0-15.0
C	> 12.0-17.0	> 15.0-20.0
D	> 17.0-22.0	> 20.0-23.0
E	> 22.0-27.0	> 23.0-25.0
F	> 27.0	> 25.0

Tabla 2.33
Niveles de servicio en tramos de entrecruzamiento

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Factor de hora pico

El factor de la hora pico (FHP) representa la variación en la circulación durante una hora. Las observaciones de la circulación in-

dican constantemente que los caudales encontrados en el período de 15 minutos del pico durante una hora no son uniformes en la hora completa. El uso del factor de la hora pico en la ecuación anterior está considerando este fenómeno.

Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

Los volúmenes de tráfico de las rampas generalmente incluyen una mezcla de diferentes tipos de vehículos (autos, buses y camiones). Éstos deberán ajustarse a una proporción de flujo equivalente expresada en vehículos de pasajero por hora por el segmento básico de autopista. Este ajuste se realiza usando el factor de ajuste f_{HV} . Una vez hallados los valores de equivalentes de camiones, E_T , y de vehículos recreacionales, E_R , el factor de ajuste f_{HV} se determina usando la ecuación

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)} \quad 2.35$$

donde

E_T, E_R = factores de equivalencia de camiones o vehículos recreacionales en vehículos de pasajeros dentro de la corriente del tráfico, respectivamente

P_T, P_R = porcentaje de camiones y vehículos recreacionales en la corriente del tráfico, respectivamente (tomados de la metodología de segmentos básicos de autopistas o vías multicarriles)

f_{HV} = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

Los ajustes para vehículos pesados de la corriente de tráfico corresponderían a tres ti-

pos de vehículos: los camiones, buses, y vehículos recreativos. Sin embargo, no hay ninguna evidencia de las diferencias en la actuación entre los camiones y buses en las vías multicarriles; por consiguiente, se tratan camiones y buses idénticamente.

Diagrama de tramo de entrecruzamiento

Después de convertir los volúmenes de tránsito en vehículos livianos, se construye un diagrama de entrecruzamiento del tipo mostrado en la Figura 2.24. Todos los flujos se muestran como proporciones de flujo en automóviles de pasajero equivalentes por hora, y se identifican las variables de análisis críticas, puestas en el diagrama. El diagrama puede usarse ahora como una referencia para toda la información requerida al aplicar la metodología.

Determinación del tipo de configuración del entrecruzamiento

La configuración del tramo de entrecruzamiento se basa en el número de cambios de carril requeridos en cada movimiento de entrecruzamiento. La Tabla 2.34 presenta los diferentes requisitos de entrecruzamiento, que se deben considerar para establecer el tipo de configuración del entrecruzamiento.

Los tres tipos de configuraciones de tramos de entrecruzamiento se definen como sigue:

- ◆ Tipo de entrecruzamiento A: en ambas direcciones, los vehículos deben hacer cambio de un carril para cumplir con éxito la maniobra de entrecruzamiento.
- ◆ Tipo de entrecruzamiento B: en una dirección, los vehículos pueden completar

una maniobra de entrecruzamiento sin hacer cambio de carril. Se considera que otros vehículos deben hacer un cambio de carril en el tramo de entrecruzamiento para completar la maniobra.

- ♦ Tipo de entrecruzamiento C: en una dirección, los vehículos pueden completar una maniobra de entrecruzamiento sin hacer un cambio de carril. Se considera que otros vehículos deben hacer dos o más cambios de carril en el tramo de entrecruzamiento para completar la maniobra.

Determinación de velocidades de entrecruzamiento y tramos sin entrecruzamiento

La importancia del tramo en análisis está en la predicción de las velocidades medias espaciales en el tramo con entrecruzamiento y en el tramo sin entrecruzamiento. Para predecir las velocidades del tramo con entrecruzamiento y sin entrecruzamiento SE emplea la expresión:

$$S_i = S_{\min} + \frac{S_{\max} - S_{\min}}{1 + W_i} \quad 2.36$$

donde

S_i = velocidad media de los vehículos en el entrecruzamiento (i=e) o sin entrecruzamiento (i=se) [km/h]

$S_{\min}$ = velocidad mínima esperada en el tramo de entrecruzamiento [km/h]

$S_{\max}$ = velocidad máxima esperada en el tramo de entrecruzamiento [km/h]

Número de cambios de carril requerido por movimiento, v_{w1}	Número de cambios de carril requerido por movimiento, v_{w2}		
	0	1	2
0	Tipo B	Tipo B	Tipo C
1	Tipo B	Tipo A	No aplica
≥ 2	Tipo C	No aplica	No aplica

Tabla 2.34
Determinación del tipo de configuración de entrecruzamiento
Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

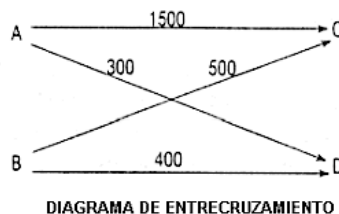
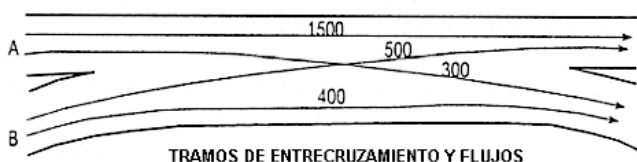


Figura 2.24
Diagrama de tramo de entrecruzamiento

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

W_i = Factor de intensidad de flujos de entrecruzamiento (i=e) o sin entrecruzamiento (i=se)

Para los propósitos de estos procedimientos, la velocidad mínima, $S_{\min}$, es 24 km/h. La velocidad máxima, $S_{\max}$, se toma de la velocidad media de flujo libre de la autopista que entra y sale del tramo de entrecruzamiento más 8 km/h. La suma de 8 km/h a la velocidad de flujo libre ajusta la tendencia del algoritmo al no predecir altas velocidades. Estableciendo las velocidades mínimas y máximas, se restringe el algoritmo a un rango de predicción razonable. Con estas presunciones incorporadas, la predicción de velocidad se da por la ecuación:

$$S_i = 24 + \frac{S_{FF} - 16}{1 + W_i} \quad 2.37$$

donde

S_i = velocidad media de los vehículos en el entrecruzamiento (i=e) o sin entrecruzamiento (i=ne) [km/h]

S_{FF} = velocidad media a flujo libre del segmento de entrecruzamiento que entra y sale del tramo de entrecruzamiento [km/h]

W_i = Factor de intensidad de flujos de entrecruzamiento (i=e) o sin entrecruzamiento (i=ne)

Las estimaciones iniciales de la velocidad siempre están basadas en la presunción de funcionamiento no restringido. Si el funcionamiento resulta ser restringido, esta presunción se prueba después, y se calculan de nuevo las velocidades.

La combinación de las ecuaciones anteriores muestra las sensibilidades, consistentes con la operación observada en los tramos de entrecruzamiento.

- ♦ Cuando la longitud de los tramos de entrecruzamiento aumenta, las velocidades también aumentan y decrece la intensidad de cambios de carril.
- ♦ Cuando se incrementa la proporción de vehículos de entrecruzamiento en el flujo total (VR), la velocidad disminuye, reflejando el incremento de la turbulencia causada por las proporciones más altas de entrecruzamientos de los vehículos en la corriente de tráfico.
- ♦ Cuando el promedio del flujo total por carril (v/N) aumenta, la disminución de velocidades, reflejan una intensa demanda.
- ♦ El funcionamiento restringido muestra las más bajas velocidades en el entrecruzamiento y las más altas velocidades en los tramos sin entrecruzamientos, que el funcionamiento no restringido. En la Tabla 2.35 se refleja esta operación, por las diferencias en la constante a .
- ♦ Las configuraciones tipo B son más eficaces para ocuparse de grandes flujos de entrecruzamiento. Las velocidades de entrecruzamiento de tales flujos son más altas que para el tipo A y el tipo C de igual longitud y ancho.
- ♦ La sensibilidad de las velocidades a la longitud es mayor para las configuraciones tipo A, porque en el entrecruzamiento los vehículos están acelerando o disminuyendo la velocidad cuando pasan el tramo de entrecruzamiento.
- ♦ La sensibilidad de las velocidades del tramo sin entrecruzamiento a la proporción de volumen (VR) es más grande para el tipo B y el tipo C. Como estas configuraciones pueden acomodar proporciones más altas de vehículos en el entrecruzamiento y como cada uno tiene a través del carril un movimiento de entrecruzamiento, los vehículos del tramo sin entrecruzamiento están probablemente más dispuestos a compartir los carriles que en la configuración tipo A, donde la oportunidad de segregar es mayor.
- ♦ El último punto es importante y sirve para resaltar la diferencia esencial entre la configuración tipo A (particularmente los entrecruzamientos de rampa) y otros (tipo B y C). Como todos los vehículos de entrecruzamiento deben pasar una línea de corona en los tramos tipo A, los vehículos que se entrecruzan tienden a concentrarse en los dos carriles adyacentes a la línea de la corona, considerando que los vehículos que no se entrecruzan migran a los carriles exteriores. Hay así sustancialmente más segregación del flujo en la configuración tipo A.
- ♦ Esta diferencia hace que los tramos tipo A se comporten algo diferente de otras configuraciones. Las velocidades tienden

a ser más altas en los tramos de entrecruzamiento tipo A que en los tipos B o C aunque tengan la misma longitud, el mismo ancho y los mismos flujos de demanda. Sin embargo, esto no sugiere que el tipo A siempre opere mejor que los tipos B o C para longitudes, anchos y flujos similares. El tipo A tiene las restricciones más severas en la cantidad de tráfico de entrecruzamiento que puede acomodarse en otras configuraciones.

Determinación de la intensidad de entrecruzamientos

La intensidad de entrecruzamientos (W_i y W_{ne}) es una medida de la influencia de la actividad de entrecruzamiento en la velocidad media de los vehículos que se entrecruzan y los que no se entrecruzan. Estos factores se calculan mediante la ecuación:

$$W_i = \frac{a(1 + VR)^b \left(\frac{v}{N} \right)^c}{(3.28L)^d} \quad 2.38$$

donde

W_i = factor de intensidad de entrecruzamiento de los flujos, para entre-

cruzamiento ($i=e$), para tramos sin entrecruzamiento ($i=ne$)

V_R = relación de volumen

v = tasa de flujo total en el tramo de entrecruzamiento [veh livianos/h]

N = número total de carriles en el tramo de entrecruzamiento

L = longitud del tramo de entrecruzamiento [m]

a, b, c, d = constantes de calibración

Las constantes de calibración (a, b, c, d) se presentan en la Tabla 2.35. La predicción del factor de intensidad de entrecruzamiento se realiza para los movimientos de entrecruzamiento y tramos sin entrecruzamiento, así como para la configuración típica y para una operación supuesta inicialmente no restringida, con lo cual se determina la velocidad del entrecruzamiento y del tramo sin entrecruzamiento.

Determinación del tipo de operación

Para determinar si un tramo de entrecruzamiento opera en una situación no restrin-

	Constantes para velocidad en entrecruzamientos, S_w				Constantes para velocidad en tramos sin entrecruzamientos, S_{nw}			
	a	b	c	d	a	b	c	d
Tipo de configuración A								
No obligado	0.15	2.2	0.97	0.80	0.0035	4.0	1.3	0.75
Obligado	0.35	2.2	0.97	0.80	0.0020	4.0	1.3	0.75
Tipo de configuración B								
No obligado	0.08	2.2	0.70	0.50	0.0020	6.0	1.0	0.50
Obligado	0.15	2.2	0.70	0.50	0.0010	6.0	1.0	.50
Tipo de configuración C								
No obligado	0.08	2.3	0.80	0.60	0.0020	6.0	1.1	0.60
Obligado	0.14	2.3	0.80	0.60	0.0010	6.0	1.1	0.60

Tabla 2.35

Constantes para el cálculo de factores de intensidad de entrecruzamientos

Fuente:

Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

gida o en estado restringido, se comparan dos variables definidas a continuación:

N_w = Número de carriles que deben usar los vehículos que se entrecruzan para lograr el equilibrio o funcionamiento no restringido.

$N_{w(MAX)}$ = Número máximo de carriles que pueden usar los vehículos que se entrecruzan en una configuración dada.

Los valores fraccionarios para los requisitos de uso de carriles en el entrecruzamiento de los vehículos pueden presentarse porque los vehículos que se entrecruzan y los que no se entrecruzan comparten algunos carriles. $N_w < N_{w(máx)}$ se considera no restringido cuando no existe impedimento para que los vehículos se entrecrucen al usar el número de carriles requeridos para el equilibrio, $N_w > N_{w(máx)}$. Los vehículos que se entrecruzan dejan de usar $N_{w(máx)}$ carriles y, por consiguiente, no se puede ocupar la vía tanto como se necesitaría para establecer los funcionamientos de equilibrio. La Tabla 2.36 presenta los algoritmos de cálculo de N_w y muestra el valor máximo de $N_{w(máx)}$.

Determinación de la velocidad en tramos de entrecruzamiento

Una vez estimados las velocidades y el tipo de funcionamiento (que puede causar un recálculo de velocidades estimadas), la velo-

cidad media espacial de todos los vehículos en el tramo de entrecruzamiento se calcula según la ecuación:

$$S = \frac{v}{\left(\frac{v_e}{S_e}\right) + \left(\frac{v_{ne}}{S_{ne}}\right)} \quad 2.39$$

donde

S = velocidad media espacial de todos los vehículos en el tramo de entrecruzamiento [km/h]

S_e = velocidad media espacial de los vehículos en el tramo de entrecruzamiento [km/h]

S_{ne} = velocidad media espacial de los vehículos en el tramo de no entrecruzamiento [km/h]

v = tasa de flujo total en el tramo de entrecruzamiento [veh. livianos/h]

v_e = tasa de flujo total de entrecruzamiento [veh. livianos/h]

v_{ne} = tasa de flujo total de no entrecruzamiento [veh. livianos/h]

Determinación de la densidad

La velocidad media de todos los vehículos se utiliza para calcular la densidad de todos los vehículos en el tramo de entrecruzamiento mediante la ecuación

$$D = \frac{\left(\frac{v}{N}\right)}{S} \quad 2.40$$

Tabla 2.36
Criterios de operación de tramos de entrecruzamiento

Fuente:

Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Configuración	Número de carriles requeridos para operación obligada, N_w	$N_{w(max)}$
Tipo A	$121(N)VR^{0.571}L^{0.234/S_w}0.438$	1.4
Tipo B	$N [0.085 + 0.703 + (7157/L) - 0.0112(S_{nw} - S_w)]$	3.5
Tipo C	$N [0.761 + 0.047VR + 0.00036L - 0.0031(S_{nw} - S_w)]$	3.0

Nota. Válido tanto para restringido como para no restringido.

donde

- D = densidad media de todos los vehículos en el tramo de entrecruzamiento [veh. livianos/km/carril]
- V = volumen total de vehículos en el tramo de entrecruzamiento [veh./h]
- N = número total de carriles en el tramo de entrecruzamiento
- S = velocidad media de todos los vehículos en el tramo de entrecruzamiento

Determinación de la capacidad de un tramo de entrecruzamiento

La capacidad de un segmento de entrecruzamiento con cualquier combinación de flujos consigue que la densidad alcance la condición de límite en los niveles de servicio E y F a los 27 veh/km/carril para autopistas a los 25.0 veh/km/carril para las vías multicarriles. La capacidad cambia según las variables siguientes: configuración, número de carriles, velocidad a flujo libre, longitud y tasas de volumen.

Los valores tabulados a continuación presentan las capacidades en varios segmentos de entrecruzamiento. Como cálculo aproximado, la interpolación se puede utilizar para hallar los valores intermedios. Las capacidades tabuladas presentan otras limitaciones en las operaciones del segmento que reflejan, entre otras, las siguientes observaciones de campo:

- ♦ La capacidad de un tramo de entrecruzamiento nunca puede superar la capacidad de un segmento básico de autopista o vía multicarril.
- ♦ Los estudios en campo revelan que estas tasas de flujo no pueden exceder los siguientes valores: para la configuración tipo A, 2.800 veh/h; 4.000 veh/h para la configuración tipo B; y 3.500 veh/h, para la configuración tipo C.
- ♦ Los estudios indican que hay limitaciones en la proporción del flujo (V_R) que puede ser asumida para los valores de las configuraciones: 1.00, 0.45, 0.35 o 0.20 para el tipo A con dos, tres cuatro o cinco carriles, respectivamente; 0.80 para el tipo B; y 0.50 para el tipo C.

Tabla 2.37
Capacidad para
varios tramos de
entrecruzamiento

Tasa del volumen VR	(A) Configuración tipo A – Velocidad a flujo libre de 120 km/h				
	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	6050	6820	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b
0.20	5490	6260	6720	7050	7200 ^b
0.30	5040	5780	6240	6570	6830
0.40	4660	5380	5530	5800 ^c	6050 ^c
0.45 ^d	4430	5000 ^c	5270 ^c	5550 ^c	5800 ^c
Tramo de cuatro carriles					
0.10	8060	9010	9600 ^b	9600 ^b	9600 ^b
0.20	7320	8340	8960	9400	9600 ^b
0.30	6710	7520 ^c	8090 ^c	8510 ^c	8840
0.35 ^e	6370 ^c	7160 ^c	7700 ^c	8000 ^f	8000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0.10	10,080	11,380	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b
0.20 ^g	9150	10,540 ^c	11,270 ^c	11,790 ^c	12,000 ^b
Tasa del volumen VR	(B) Configuración tipo A – Velocidad a flujo libre de 110 km/h				
	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	5770	6470	6880	7050 ^b	7050 ^b
0.20	5250	5960	6280	6680	6900
0.30	4830	5520	5940	6240	6480
0.40	4480	5150	5250 ^c	5530 ^c	5760 ^c
0.45 ^d	4190	4790 ^c	5020 ^c	5310 ^c	5530 ^c
Tramo de cuatro carriles					
0.10	7690	8630	9180	9400 ^b	9400 ^b
0.20	7000	7940	8500	8900	9200
0.30	6440	7180 ^c	7710 ^c	8000 ^c	8390 ^c
0.35 ^e	6080 ^c	6830 ^c	7360 ^c	7730 ^c	8030 ^c
Tramo de cinco carriles					
0.10	9610	10,790	11,470	11,750 ^b	11,750 ^b
0.20 ^g	8750	10,030 ^c	10,690 ^c	11,160 ^c	11,520 ^c

Fuente:
Manual de capacidad
de carreteras
(HCM 2000)

(C) Configuración tipo A – Velocidad a flujo libre de 100 km/h					
Tasa del volumen VR	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	5470	6110	6480	6730	6910
0.20	5000	5640	6020	6290	6490
0.30	4610	5240	5620	5900	6110
0.40	4290	4900	4990 ^c	5250 ^c	5460 ^c
0.45 ^d	4000	4520 ^c	4790 ^c	5040 ^c	5200 ^c
Tramo de cuatro carriles					
0.10	7300	8150	8630	8970	9220
0.20	6660	7520	8030	8380	8650
0.30	6080 ^c	6830 ^c	7310 ^c	7650 ^c	7920 ^c
0.35 ^e	5780 ^c	6520 ^c	6990 ^c	7330 ^c	7600 ^c
Tramo de cinco carriles					
0.10	9120	10,180	10,790	11,210	11,500 ^b
0.20 ^g	8330	9500 ^c	10,080 ^c	10,510 ^c	10,830 ^c
(D) Configuración tipo A – Velocidad a flujo libre de 90 km/h					
Tasa del volumen VR	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	5160	5730	6050	6270	6430
0.20	4730	5310	5650	5880	6060
0.30	4380	4850	5290	5540	5720
0.40	4090	4420 ^c	4730 ^c	4960 ^c	5140 ^c
0.45 ^d	3850	4240 ^c	4470 ^c	4780 ^c	4950 ^c
Tramo de cuatro carriles					
0.10	6880	7460	8070	8350	8570
0.20	6310	7080	7530	7840	8080
0.30	5790 ^c	6360 ^c	6890 ^c	7190 ^c	7430 ^c
0.35 ^e	5520 ^c	6180 ^c	6590 ^c	6910 ^c	7140 ^c
Tramo de cinco carriles					
0.10	8600	9550	10,080	10,440	10,710
0.20 ^g	8060 ^c	8930 ^c	9460 ^c	9820 ^c	10,100 ^c

Tabla 2.38
(continuación)
Capacidad para
varios tramos de
entrecruzamiento

Fuente:
Manual de capacidad
de carreteras
(HCM 2000)

Tabla 2.39
(continuación)
Capacidad para
varios tramos de
entrecruzamiento

(E) Configuración tipo B – Velocidad a flujo libre de 100 km/h					
Tasa del volumen VR	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750^a
Tramo de tres carriles					
0.10	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b
0.20	6830	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b
0.30	6120	6690	7010	7200 ^b	7200 ^b
0.40	5550	6100	6430	6670	6850
0.50	5100	5630	5950	6180	6370
0.60	4750	5260	5570	5800	5980
0.70	4180	4990	5290	5520	5690
0.80 ^h	3900	4820	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f
Tramo de cuatro carriles					
0.10	9600 ^b	9600 ^b	9600 ^b	9600 ^b	9600 ^b
0.20	9110	9600 ^b	9600 ^b	9600 ^b	9600 ^b
0.30	8170	8910	9350	9600 ^b	9600 ^b
0.40	7400	8140	8570	8890	9130
0.50	6670 ^c	7500	7930	8000 ^f	8000 ^f
0.60	6070 ^c	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f
0.70	5580 ^c	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0-10	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b
0.20	11,390	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b
0.30	10,210	11,140	11,690	12,000 ^b	12,000 ^b
0.40	9270 ^c	10,000 ^f	10,000 ^f	10,000 ^f	10,000 ^f
0.50	8000 ^f	8000 ^f	8000 ^f	8000 ^f	8000 ^f
0.60	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f
0.70	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f

Fuente:
Manual de capacidad
de carreteras
(HCM 2000)

(F) Configuración tipo B - Velocidad a Flujo Libre de 110 km/h					
Tasa del volumen VR	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	7050 ^b	7050 ^b	7050 ^b	7050 ^b	7050 ^b
0.20	6460	6950	7050 ^b	7050 ^b	7050 ^b
0.30	5810	6320	6620	6830	6980
0.40	5280	5790	6090	6300	6470
0.50	4860	5350	5650	5860	6030
0.60	4550	5010	5300	5510	5680
0.70	4320	4770	5050	5250	5410
0.80 ^h	3650	4600	4880	5000 ^f	5000 ^f
Tramo de cuatro carriles					
0.10	9400 ^b	9400 ^b	9400 ^b	9400 ^b	9400 ^b
0.20	8610	9270	9400 ^b	9400 ^b	9400 ^b
0.30	7750	8430	8820	9100	9310
0.40	7040	7720	8120	8400	8620
0.50	6370 ^c	7140	7530	7820	8000 ^f
0.60	5810 ^c	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f
0.70	5350 ^c	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0.10	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b
0.20	10,760	11,590	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b
0.30	9690	10,540	11,030	11,370	11,640
0.40	8830 ^c	9650	10,000 ^f	10,000 ^f	10,000 ^f
0.50	7960 ^c	8000 ^f	8000 ^f	8000 ^f	8000 ^f
0.60	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f
0.70	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f

Tabla 2.40
(continuación)
Capacidad para
varios tramos de
entrecruzamiento

Fuente:
Manual de capacidad
de carreteras
(HCM 2000)

Tabla 2.41
(continuación)
Capacidad para
varios tramos de
entrecruzamiento

Tasa del volumen VR	(G) Configuración tipo B – Velocidad a flujo libre de 100 km/h				
	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	6750	6900 ^b	6900 ^b	6900 ^b	6900 ^b
0.20	6070	6510	6750	6900 ^b	5900 ^b
0.30	5490	5950	6210	6400	6540
0.40	5010	5470	5740	5930	6070
0.50	4620	5070	5340	5530	5680
0.60	4330	4760	5020	5220	5360
0.70	4120	4530	4790	4970	5120
0.80 ^h	3600	4380	4630	4820	4960
Tramo de cuatro carriles					
0.10	9000	9200 ^b	9200 ^b	9200 ^b	9200 ^b
0.20	8100	8680	9010	9200 ^b	9200 ^b
0.30	7320	7930	8280	8530	8710
0.40	6680	7290	7650	7900	8100
0.50	6060 ^c	6760	7120	7370	7580
0.60	5540 ^c	6340	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f
0.70	5130 ^c	5640 ^b	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	4800 ^c	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0.10	11,250	11,500 ^b	11,500 ^b	11,500 ^b	11,500 ^b
0.20	10,120	10,850	11,260	11,500 ^b	11,500 ^b
0.30	9150	9910	10,350	10,660	10,890
0.40	8370 ^c	9110	9560	9880	10,000 ^f
0.50	7570 ^c	8000 ^f	8000 ^f	8000 ^f	8000 ^f
0.60	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f
0.70	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f

Fuente:
Manual de capacidad
de carreteras
(HCM 2000)

Tasa del volumen VR	(H) Configuración tipo B - Velocidad a flujo libre de 90 km/h				
	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	6270	6600	6750 ^b	6750 ^b	6750 ^b
0.20	5670	6050	6270	6410	6520
0.30	5150	5560	5790	5950	6070
0.40	4720	5130	5370	5540	5670
0.50	4370	4770	5010	5190	5320
0.60	4110	4500	4730	4900	5030
0.70	3910	4200	4520	4690	4820
0.80 ^h	3440	4150	4380	4540	4670
Tramo de cuatro carriles					
0.10	8350	8800	9000 ^b	9000 ^b	9000 ^b
0.20	7560	8070	8360	8550	8690
0.30	6870	7410	7720	7940	8100
0.40	6290	6840	7160	7390	7560
0.50	5740 ^c	6360	6680	6920	7090
0.60	5270 ^c	5900	6310	6530	6670 ^f
0.70	4890 ^c	5350 ^c	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	4590 ^c	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0.10	10,440	10,900	11,250 ^b	11,250 ^b	11,250 ^b
0.20	9450	10,090	10,440	10,680	10,860
0.30	8580	9260	9650	9920	10,120
0.40	7890 ^c	8550	8950	9230	9450
0.50	7170 ^c	7960	8000 ⁱ	8000 ^f	8000 ^f
0.60	6580 ^c	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f	6670 ^f
0.70	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f	5760 ^f
0.80 ^h	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f	5000 ^f

Tabla 2.42
(continuación)
Capacidad
para varios
tramos de
entrecru-
zamiento

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Tabla 2.43
(continuación) Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento

Tasa del volumen VR	(I) Configuración tipo C – Velocidad a flujo libre de 120 km/h				
	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b
0.20	6590	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b	7200 ^b
0.30	5890	6540	6930	7200	7200 ^b
0.40	5530	5960	6350	6620	6840
0.50 ⁱ	4890	5500	5870	6140	6360
Tramo de cuatro carriles					
0.10	8060	9010	9600 ^b	9600 ^b	9600 ^b
0.20	7320	8340	8960	9400	9600 ^b
0.30	6710	7520 ^c	8090 ^c	8510 ^c	8840
0.35 ^e	6370 ^c	7160 ^c	7700 ^c	8000 ^f	8000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0.10	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b
0.20	11,520 ^c	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b	12,000 ^b
0.30	10,140 ^c	11,170 ^c	11,670 ^f	11,670 ^f	11,670 ^f
0.40	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f
0.50 ⁱ	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f
Tasa del volumen VR	(J) Configuración tipo C - Velocidad a flujo libre de 110 km/h				
	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	7010	7050 ^b	7050 ^b	7050 ^b	7050 ^b
0.20	6240	6830	7050 ^b	7050 ^b	7050 ^b
0.30	5610	6200	6550	6790	6980
0.40	5090	5670	6020	6270	6470
0.50 ⁱ	4680	5240	5590	5840	6030
Tramo de cuatro carriles					
0.10	9350	9400 ^b	9400 ^b	9400 ^b	9400 ^b
0.20	8320	9100	9400 ^b	9400 ^b	9400 ^b
0.30	7470	8270	8730	9060	9300
0.40	6240	7560	8030	8360	8620
0.50 ⁱ	5830	6990	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0.10	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b
0.20	10,900 ^c	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b	11,750 ^b
0.30	9630 ^c	10,570 ^c	10,910	11,320	11,630
0.40	8590 ^c	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f
0.50 ⁱ	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f

Fuente:
Manual de capacidad
de carreteras
(HCM 2000)

(K) Configuración tipo C - Velocidad a Flujo Libre de 100 km/h					
Tasa del volumen VR	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	6570	6900 ^b	6900 ^b	6900 ^b	6900 ^b
0.20	5890	6410	6700	6900	6900 ^b
0.30	5310	5850	6160	6370	6540
0.40	4840	5370	5600	5910	6080
0.50 ⁱ	4460	4970	5290	5510	5690
Tramo de cuatro carriles					
0.10	8760	9200 ^b	9200 ^b	9200 ^b	9200 ^b
0.20	7850	8540	8930	9200	9200 ^b
0.30	7080	7790	8210	8500	8720
0.40	6450	7150	7580	7880	8110
0.50 ⁱ	5950	6630	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0.10	11,500 ^b	11,500 ^b	11,500 ^b	11,500 ^b	11,500 ^b
0.20	10,250 ^c	11,050 ^c	11,170	11,500	11,500 ^b
0.30	9110 ^c	9900 ^c	10,260	10,620	10,900
0.40	8170 ^c	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f
0.50 ⁱ	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f

Tabla 2.44
(continuación)
Capacidad para varios tramos de entrecruzamiento

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Tabla 2.45
(continuación)
Capacidad para
varios tramos de
entrecruzamiento

Tasa del volumen VR	(L) Configuración tipo C - Velocidad a Flujo Libre de 90 km/h				
	Longitud del tramo de entrecruzamiento (m)				
	150	300	450	600	750 ^a
Tramo de tres carriles					
0.10	6120	6520	6730	6750 ^b	6750 ^b
0.20	5510	5970	6230	6400	6520
0.30	5000	5480	5750	5940	6090
0.40	4570	5050	5330	5530	5680
0.50 ⁱ	4230	4700	4980	5180	5330
Tramo de cuatro carriles					
0.10	8150	8700	8980	9000 ^b	9000 ^b
0.20	7350	7950	8300	8530	8700
0.30	6660	7300	7570	7920	8110
0.40	5640	6730	7110	7370	7580
0.50 ⁱ	5300	5260	6640	6900	7000 ^f
Tramo de cinco carriles					
0-10	10,770 ^c	11,250 ^b	11,230	11 250 ^b	11,250 ^b
0.20	9580 ^c	10,270 ^c	10,380	10,660	10,870
0.30	8570 ^c	9310 ^c	9580	9900	10,140
0.40	7720 ^c	8470 ^c	8750 ^f	8750 ^f	8750 ^f
0.50 ⁱ	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f	7000 ^f

Fuente:
Manual de
capacidad
de carreteras
(HCM 2000)

Nota: Las consideraciones indicadas por las letras a, b, c, d, e, f, g, h, i, deberán ser tomadas según indicaciones del HCM, capítulo 24, páginas 24-18.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Transportation Research Board. Manual de Capacidad para Carreteras (HCM - 2000). Washington, D.C, 2000.

Ministerio de Transporte, Universidad del Cauca. Manual de Capacidad y Niveles de Servicio

para Carreteras de Dos Carriles. Popayán, 1996.

An Enhanced Program to Model Capacities, Queues and Delays at roundabouts, Transport Research Laboratory (TRL), 1985.

Transit Capacity and Quality of Service Manual, Transportation Research Board, 1999.

3

Capacidad y Niveles de Servicio, flujo discontinuo

CONTENIDO

3.1	INTERSECCIONES CONTROLADAS CON SEMÁFORO	3-7
3.1.1	Características físicas y funcionales	3-7
3.1.1.1	Los semáforos	3-8
3.1.1.2	Capacidad y niveles de servicio	3-10
3.1.1.3	Capacidad de las intersecciones controladas con semáforo	3-10
3.1.1.4	Niveles de servicio para las intersecciones controladas con semáforo	3-11
3.1.1.5	Relación de la capacidad y los niveles de servicio	3-12
3.1.1.6	Niveles de análisis	3-12
3.1.2	Condiciones básicas para el análisis	3-13
3.1.3	Metodología	3-13
3.1.3.1	Parámetros de entrada	3-14
3.2	INTERSECCIONES DE PRIORIDAD CON SEÑAL DE “PARE”	3-24
3.2.1	Características físicas y funcionales	3-24
3.2.1.1	Tránsito conflictivo	3-24
3.2.1.2	Tamaño de la brecha crítica, t_g	3-25
3.2.1.3	Tiempo de seguimiento, t_f	3-25
3.2.1.4	Capacidad potencial para un movimiento	3-25
3.2.1.5	Factores de impedancia	3-25
3.2.2	Condiciones básicas para el análisis	3-26
3.2.3	Metodología	3-27
3.2.3.1	Nivel de servicio	3-27
3.2.3.2	Parámetros de entrada	3-28
3.2.3.3	Tránsito conflictivo	3-28
3.2.3.4	Determinación del tamaño de la brecha crítica, t_c	3-29
3.2.3.5	Determinación del tiempo de seguimiento, t_f	3-29
3.2.3.6	Determinación de la capacidad potencial	3-31
3.2.3.7	Factores de impedancia	3-32
3.2.3.8	Determinación de la capacidad del carril compartido	3-35
3.2.3.9	Determinación del nivel de servicio	3-37
3.3	GLORIETAS	3-38
3.3.1	Evolución del concepto de capacidad	3-41
3.3.2	Requerimientos de información	3-42
3.3.2.1	Elementos geométricos	3-43
3.3.3	El Método del TRL	3-43
3.3.3.1	Efecto de la capacidad en ramales con abocinamientos	3-46
3.3.3.2	Efecto de peatones sobre la capacidad	3-46
3.3.3.3	Capacidad en las salidas	3-47
3.3.4	El Método del CETUR-86	3-47
3.3.5	El Método del HCM-2000	3-49
3.3.6	Análisis de funcionamiento	3-50
3.4	ARTERIAS URBANAS	3-54

3.4.1	Características físicas y funcionales	3-54
3.4.2	Condiciones básicas para el análisis	3-59
3.4.3	Metodología	3-60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		3-74

FIGURAS

Figura 3.1	Metodología para el análisis de capacidad según la estructura vial	3-8
Figura 3.2	Metodología para el análisis de intersecciones controladas con semáforo	3-14
Figura 3.3	Metodología para el análisis de intersecciones de prioridad	3-27
Figura 3.4	Esquema de los movimientos en una intersección regulada con señal de "pare"	3-29
Figura 3.5	Capacidad potencial para vías de dos carriles	3-32
Figura 3.6	Capacidad potencial para vías de cuatro carriles	3-32
Figura 3.7	Ajuste del factor de impedancia	3-34
Figura 3.8	Demora total y volumen de flujo	3-37
Figura 3.9	Curvas de capacidad potencial para giro a la derecha en vía secundaria	3-38
Figura 3.10	Curvas de capacidad potencial para movimiento directo en vía secundaria	3-39
Figura 3.11	Curvas de capacidad en intersecciones de prioridad reguladas con señal de "pare"	3-39
Figura 3.12	Geometría básica en glorietas	3-40
Figura 3.14	Elementos geométricos en una glorieta	3-44
Figura 3.13	Identificación de movimientos vehiculares en glorietas	3-44
Figura 3.15	Curva de capacidad Calle 63 con Carrera 48	3-46
Figura 3.16	Definición de parámetros geométricos (D, R, E, Y, V)	3-46
Figura 3.17	Definición de parámetros geométricos (L')	3-47
Figura 3.18	Definición de parámetros geométricos (θ)	3-47
Figura 3.19	Reducción de la capacidad en glorietas de doble carril	3-48
Figura 3.20	Curva de capacidad - método del CETUR	3-49
Figura 3.21	Capacidad del ramal (HCM)	3-50
Figura 3.22	Demoras en función de la capacidad y el flujo	3-52
Figura 3.23	Parámetros asociados a la demora geométrica (1)	3-54
Figura 3.24	Parámetros asociados a la demora geométrica (2)	3-54
Figura 3.25	Percentil 95 de la estimación de colas	3-55
Figura 3.26	Perfiles típicos de velocidad vehicular en vías urbanas	3-59
Figura 3.27	Metodología para arterias urbanas	3-61
Figura 3.28	Tipos de segmentos en una arteria urbana	3-73

TABLAS

Tabla 3.1	Descripción del nivel de servicio para intersecciones controladas con semáforo	3-12
Tabla 3.2	Datos necesarios para el análisis de cada grupo de carriles	3-15
Tabla 3.3	Tipo de llegadas	3-16
Tabla 3.4	Grupos de carriles típicos para análisis	3-17
Tabla 3.5	Factores de ajuste al flujo de saturación	3-19

Tabla 3.6	Relación entre el tipo de llegada y la relación del pelotón	3-20
Tabla 3.7	Factor de ajuste de progresión para el cálculo de la demora uniforme	3-21
Tabla 3.8	Parámetros medio local	3-24
Tabla 3.9	Descripción de los niveles de servicio para intersecciones de prioridad	3-28
Tabla 3.10	Definición y cálculo de los volúmenes de los movimientos conflictivos	3-30
Tabla 3.11	Brecha crítica base y tiempo de seguimiento base	3-31
Tabla 3.12	Relación jerárquica peatón / vehículo	3-35
Tabla 3.13	Brecha crítica T_g para inter- secciones de prioridad reguladas con señales de “pare”	3-38
Tabla 3.14	Tiempos de seguimiento (T_f) para intersecciones de prioridad reguladas con “pare”	3-38
Tabla 3.15	Brecha crítica y período siguiente	3-50
Tabla 3.16	Clasificación de vías urbanas (categorías funcionales y de diseño)	3-56
Tabla 3.17	Categorías funcionales y de diseño	3-57
Tabla 3.18	Nivel de servicio para arterias urbanas según su clasificación	3-62
Tabla 3.19	Información de entrada para vías urbanas	3-63
Tabla 3.21	Densidad de semáforos según el tipo de vía	3-64
Tabla 3.20	Velocidad a flujo libre según el tipo de vía	3-64
Tabla 3.22	Tiempo de marcha por kilómetro	3-65
Tabla 3.23	Relación entre tipo de arribo y tamaño del pelotón (RP)	3-68
Tabla 3.24	Factor de ajuste por progresión para una demora uniforme	3-69
Tabla 3.25	Valores de K para el tipo de control	3-70
Tabla 3.26	Valores de l para grupos de carriles con semáforos corriente arriba	3-71
Tabla 3.27	Resultados velocidad a flujo libre corredor Carrera 7ª	3-74

Continuando con la presentación de las metodologías que permiten establecer las condiciones del movimiento de los vehículos, así como la disponibilidad, comodidad y conveniencia del servicio según la infraestructura, en el presente capítulo se expone el análisis de capacidad y niveles de servicio en intersecciones controladas con semáforo, intersecciones de prioridad controladas con señal de “PARE”, glorietas y vías arterias urbanas, estructuras características del flujo discontinuo.

Continúa la exposición de la experiencia obtenida por el Transportation Research Board, descrita en el *Manual de capacidad de carreteras* (HCM-2000) en el análisis de capacidad y nivel de servicio de una infraestructura vial con características de flujo discontinuo, adaptando algunos de sus parámetros al medio bogotano. Así mismo se presenta la metodología que desarrolló el Transport Research Laboratory (TRL) y el CETUR 86 para el análisis de capacidad en glorietas.

Para comprender mejor el desarrollo de este numeral, se presenta la Figura 3.1, que relaciona los temas tratadas.

3.1 INTERSECCIONES CONTROLADAS CON SEMÁFORO

3.1.1 Características físicas y funcionales

El análisis de las intersecciones controladas con semáforo es uno de los lugares más complejos en la corriente del tránsito y debe considerar una amplia variedad de condiciones prevalecientes, que incluyen: la cantidad y la distribución de los movimientos del tránsito, su composición, las características geométricas y los detalles de la semaforización de la intersección.

En otros tipos de vías, la capacidad está relacionada principalmente con las características geométricas de la vía y con la composición del tránsito de ella. En las intersecciones controladas con semáforo, se introduce un elemento adicional al concepto de capacidad: la asignación del tiempo. Un semáforo asigna un tiempo a los movimientos del tránsito conflictivo que buscan el uso del mismo espacio físico. La forma en que se asigna el tiempo tiene un impacto significativo en la operación de la intersección y en la capacidad de la misma y sus accesos. La capacidad se

Los semáforos pueden funcionar de tres maneras básicas dependiendo del tipo de equipo de control utilizado:

- ◆ Operación de tiempo fijo.
- ◆ Operación semiactuada.
- ◆ Operación totalmente actuada.

Operación de tiempo fijo. En ésta, la duración del ciclo, las fases, los tiempos de verde y los cambios de intervalo son preestablecidos, permitiendo definir varios programas que pueden accionarse automáticamente a tiempos fijos durante el día. Pueden operar en intersecciones aisladas y en intersecciones que operan como parte de un sistema coordinado.

Operación semiactuada. En ésta, la calle principal asignada siempre tiene fase verde hasta que los detectores de la calle secundaria determinen que un vehículo o vehículos hayan llegado a uno o ambos accesos, para darle el tiempo de verde a esta última calle después de un cambio de intervalo adecuado, el cual se mantiene hasta que todos los vehículos son servidos o hasta que el tiempo de verde máximo preestablecido para la calle secundaria sea ocupado por completo. En esta operación, la duración del ciclo y los tiempos de verde pueden variar de ciclo a ciclo en respuesta a la demanda. Esta operación también puede programarse en intersecciones aisladas o coordinadas.

Operación totalmente actuada. En ésta, todas las fases del semáforo son controladas por detectores. En este tipo de control se especifican los tiempos de verde máximos y mínimos para cada fase. Las duraciones de los ciclos y los tiempos de verde varían considerablemente en respuesta a la demanda. Ciertas fases en el ciclo pueden ser opcionales y pueden “saltarse” si los sensores no detectan la demanda. Aunque este tipo de operación ofrece el mayor beneficio en cuanto a flexibi-

lidad y optimización de tiempo en una sola intersección, no se puede emplear adecuadamente en los sistemas coordinados.

Hoy en día muchos sistemas de semáforos están controlados por computadoras. En estos casos, las intersecciones generalmente operan bajo controles de tiempo fijo para maximizar la coordinación o semiactuados para minimizar la cantidad de tiempo de verde innecesario asignado a los movimientos menores. Esto permite que el plan de fases y la coordinación de semáforos sean controlados por computadoras.

No solamente la distribución de tiempo de verde es significativa en la capacidad y en la operación de las intersecciones controladas con semáforo, sino también la manera en que los movimientos de giro se acomodan en la secuencia de las fases. Los semáforos pueden proporcionar movimientos de giro protegidos, permitidos y sin flujos opuestos.

Un movimiento permitido de giro es el que se realiza a pesar de tener flujos de vehículos en el sentido opuesto y cruce de peatones. El movimiento protegido es el que se realiza sin los flujos anteriores, como los giros izquierdos exclusivos o los giros derechos cuando se prohíbe el movimiento de peatones.

Así, un giro permitido consume más verde del proporcionado a un verde protegido, debido a la fricción de tener que seleccionar una brecha (espacio) entre vehículos o peatones adecuada en el flujo opuesto. Tanto el giro protegido como el permitido pueden ser más eficientes en una situación dada, dependiendo de los volúmenes opuestos, de la geometría de la intersección y de otros factores.

En una intersección, la capacidad depende mucho del control semafórico presente. Dado el rango potencial de control del semáforo, la capacidad es más variable que para

otro tipo de vías, donde ésta depende principalmente de la geometría del camino.

3.1.1.2 Capacidad y niveles de servicio

Para las intersecciones controladas con semáforo, ambos conceptos se analizan por separado y no tienen una relación sencilla entre sí. La capacidad se calcula para cada grupo de carriles que llegan a la intersección. Un grupo de carriles está definido como uno o más carriles que llevan un flujo vehicular y tienen una línea de pare común y una capacidad compartida por los vehículos. El análisis de capacidad se obtiene de la relación volumen/capacidad (v/c) para cada grupo de carriles. La relación v/c es el valor de flujo actual o futuro en el acceso o en el grupo de carriles asignado durante los 15 minutos máximos dividido entre la capacidad de acceso o del grupo de carriles asignado.

El nivel de servicio se basa en la demora promedio por parada por vehículo para varios movimientos dentro de la intersección. Aunque la relación v/c afecta la demora, existen otros parámetros que la afectan más fuertemente, como la calidad de la sincronía, la duración de las fases de verde, la duración del ciclo y otros. Así, una relación v/c dada, puede generar una gran cantidad de valores para la demora. Por esta razón, tanto la capacidad como el nivel de servicio deben analizarse con cuidado.

3.1.1.3 Capacidad de las intersecciones controladas con semáforo

La capacidad está definida para cada acceso de la intersección: valor de flujo máximo (del acceso en estudio) que puede pasar a través de la intersección en condiciones prevale-

cientes del tránsito, de la vía y de la semaforización. Se establece en vehículos por hora.

Las condiciones de tránsito incluyen los volúmenes en cada acceso, la distribución de los vehículos por movimiento (izquierdo, derecho y directo), la distribución por tipo de vehículo en cada movimiento, la ubicación y la utilización de las paradas de buses dentro de la zona de la intersección, junto con los flujos de peatones y maniobras de estacionamiento.

Las condiciones de la vía consideran la geometría básica de la intersección, que incluye el número y ancho de carriles, las pendientes y la utilización de los carriles (incluidos los carriles de estacionamiento).

Las condiciones de la semaforización abarcan una definición completa de las fases del semáforo, su duración, su tipo de control y la evaluación de cada acceso.

La capacidad en las intersecciones controladas con semáforo está basada en el concepto de flujos de saturación y valores de flujo de saturación. Éstos últimos se definen como el valor de flujo máximo que puede pasar por un acceso de una intersección o un grupo de carriles dado en condiciones prevalecientes del tránsito y de la vía, suponiendo que el acceso o el grupo de carriles tuvo el 100% del tiempo real disponible como tiempo de verde efectivo. El valor de flujo para un acceso o grupo de carriles dado está definido como la relación entre el valor de flujo actual (v_i) y el valor de flujo de saturación (s_i), cada acceso o grupo de carriles i se expresan con el símbolo $(v/s)_i$.

Entonces, la capacidad es

$$c_i = s_i (g_i / C)_i \quad 3.1$$

donde

c_i = capacidad del grupo de carriles o el acceso dado [veh./hl]

s_i = valor de flujo de saturación para el grupo de carriles o acceso [veh./h]

$(g_i/C)_i$ = relación de verde para el grupo de carriles o acceso i

La relación entre el valor de flujo y la capacidad v/c se denota mediante el símbolo X (grado de saturación) en el análisis de la intersección para enfatizar la estrecha relación de la capacidad y las condiciones de semaforización. Para un grupo de carriles dado o un acceso i :

$$X_i = (v/c)_i = v_i / (s_i g_i / C) = v_i C / (s_i g_i) \quad \mathbf{3.2}$$

donde

X_i = relación v/c para un acceso o grupo de carriles i

v_i = valor de flujo de demanda actual o proyectado para un acceso o grupo de carriles i , [veh./h]

s_i = valor de flujo de saturación para un acceso o grupo de carriles i , [veh./h]

g_i = tiempo de verde efectivo para un acceso o grupo de carriles i , [s]

Los valores de X varían de 1.00 cuando el valor de flujo es igual a la capacidad y 0.00 cuando el valor de flujo es 0.00.

La capacidad de la intersección completa no es un concepto importante y no está específicamente definido. Todos los movimientos en la intersección raramente se saturan al mismo tiempo en el día. Por tanto, la preocupación crítica es la eficiencia de los movimientos individuales que circulan en la intersección.

Otro concepto de capacidad en el análisis de las intersecciones controladas por semáforo es la relación v/c crítica, X_c . Ésta considera sólo los grupos de carriles o accesos que tienen el mayor valor de flujo $(v/c)_i$ para una fase dada.

La relación v/c crítica para una intersección se define como:

$$X_c = \sum (v/s)_{ci} [C / (C - l)] \quad \mathbf{3.3}$$

donde

X_c = relación v/c crítica para la intersección

$S(v/s)_{ci}$ = sumatoria de los valores de flujo para todos los grupos de carriles o accesos críticos i

C = duración del ciclo [s]

L = total de tiempo perdido en el ciclo, calculado como la suma de tiempo perdido en el arranque y en el cambio de intervalo menos la porción del cambio de intervalo usado por los vehículos en el grupo de carriles críticos para cada fase

Esta ecuación es útil para evaluar la intersección general con relación a la geometría y a la duración total del ciclo, y para estimar los tiempos de las fases cuando no se conocen, proporcionando la relación v/c para los movimientos críticos, suponiendo que el tiempo de verde ha sido el apropiado o distribuido proporcionalmente. Por tanto, es posible obtener una relación v/c menor que 1.00 que tenga movimientos individuales sobresaturados dentro del ciclo del semáforo. Una relación v/c menor que 1.00 indica que todos los movimientos en la intersección pueden ser acomodados dentro del ciclo y la secuencia de sus fases, distribuyendo adecuadamente los tiempos de verde.

3.1.1.4 Niveles de servicio para las intersecciones controladas con semáforo

Están definidos en relación con la demora. Ésta es una medida que refleja la molestia

Nivel de servicio	Características de la operación	Demora (segundos)
A	Baja demora, sincronía extremadamente favorable y ciclos cortos. Los vehículos no se detienen	≤ 10
B	Ocorre con una buena sincronía y ciclos cortos. Los vehículos empiezan a detenerse.	$> 10 - 20$
C	Ocorre con una sincronía regular o ciclos largos; los ciclos individuales empiezan a fallar.	$> 20 - 35$
D	Empieza a notarse la influencia de congestionamientos ocasionados por un ciclo largo y/o una sincronía desfavorable o relaciones v/c altas, muchos vehículos se detienen.	$> 35 - 55$
E	Es el límite aceptable de la demora; indica una sincronía muy pobre, grandes ciclos y relaciones v/c mayores, las fallas en los ciclos son frecuentes.	$> 55 - 80$
F	El tiempo de demora es inaceptable para la mayoría de los conductores, ocurren cuando los valores de flujo exceden a la capacidad de la intersección o cuando las relaciones v/c son menores de 1.00 pero con una sincronía muy deficiente y/o ciclos demasiado largos.	> 80

Tabla 3.1
Descripción del nivel de servicio para intersecciones controladas con semáforo

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000).
Elaboración propia

y frustración del conductor, el consumo de combustible y la pérdida de tiempo en el viaje. Estos niveles de servicio se han establecido en relación con la demora promedio por parada por vehículo.

La demora es una medida compleja y depende de un número de variables que incluyen la calidad de la sincronía, la duración del ciclo, la relación de verde y la relación v/c para un grupo de carriles o accesos en estudio. La Tabla 3.1 describe los niveles de servicio para las intersecciones con semáforo.

3.1.1.5 Relación de la capacidad y los niveles de servicio

Es posible tener demoras en el rango del nivel de servicio F (inaceptable) cuando la relación v/c es mayor de 1.00, quizá con valores tan bajos como 0.75 - 0.85. En estas relaciones pueden ocurrir grandes demoras cuando existan algunas de las siguientes condiciones:

- ♦ La duración del ciclo es grande.
- ♦ El grupo de carriles o acceso en cuestión se ve en desventaja (teniendo un tiempo de rojo largo) por los tiempos del semáforo.

- ♦ La sincronía de semáforos para los movimientos estudiados es deficiente.
- ♦ Puede suceder la situación opuesta. Un acceso o grupo de carriles con una relación $v/c = 1,00$ puede tener demoras si:
- ♦ La duración del ciclo es corta.
- ♦ La sincronía de semáforos no es favorable para el movimiento en estudio.

El nivel de servicio F no implica que la intersección, el acceso o el grupo de carriles estén sobrecargados, ni que el nivel de servicio entre A y E indique que existe una capacidad disponible no utilizada.

Los métodos y los procedimientos de este capítulo requieren los análisis de la capacidad y el nivel de servicio para evaluar completamente la operación de la intersección controlada por semáforo.

3.1.1.6 Niveles de análisis

Se pueden presentar dos niveles de análisis: el análisis operacional y el análisis de planificación.

El primero requiere una detallada información de las condiciones prevalecientes del

tránsito, de la vía y del control semafórico. De ahí se logra un análisis completo de la capacidad y del nivel de servicio. Además, se puede evaluar demandas de tránsito alternativas, diseños geométricos y planes para semáforos.

El segundo sólo analiza la capacidad debido a que la información detallada necesaria para estimar la demora no está disponible. El procedimiento ofrece amplios resultados que permiten determinar si la intersección puede o no sobresaturarse.

El análisis operacional podrá utilizarse en la mayoría de los análisis de las intersecciones existentes o en situaciones futuras en la cual el tránsito, la geometría y los parámetros de control estén bien establecidos. Se pueden definir:

El nivel de servicio, conociendo los detalles del flujo de la intersección, el control semafórico y la geometría.

Los valores de flujo de servicio permitidos para un nivel de servicio seleccionado, conociendo los detalles de semaforización y geometría.

El tiempo para las fases, conociendo el nivel de servicio deseado y los detalles del flujo y la geometría.

La geometría básica (número o distribución de carriles), conociendo el nivel de servicio deseado y los detalles de flujo y semaforización.

3.1.2 Condiciones básicas para el análisis

La metodología se basa en planes de semaforización conocidos o proyectados. Para establecer planes de semaforización, se dispone de dos procedimientos:

- ♦ El primero, o método de estimación rápido, produce estimativos de la longitud

del ciclo y de los tiempos de verde. Requiere mínimos datos de campo y se basa en valores por defecto.

- ♦ El segundo es un procedimiento más detallado, provisto en el capítulo 16 del *HCM*, versión 2000. El procedimiento utiliza como criterio la igualdad del grado de saturación crítico de cada fase. Sin embargo, este procedimiento no provee el ciclo óptimo.

Así mismo, se establecen limitaciones para la aplicación de esta metodología, las cuales se plantean a continuación.

- ♦ No toma en cuenta el impacto potencial de la congestión, corriente abajo, en la operación de la intersección analizada.
- ♦ La metodología no detecta ni ajusta los impactos de los sobreflujos en bahías de giros en la operación de los movimientos de frente.

3.1.3 Metodología

La metodología se enfoca en la determinación de los niveles de servicio en condiciones conocidas o proyectadas. La metodología se ocupa, como ya se mencionó, de la capacidad, los niveles de servicio y otras medidas de efectividad de grupos de carriles y accesos de la intersección; así como del nivel de servicio de la intersección en conjunto.

La capacidad se evalúa con respecto a la relación tasa de flujo de demanda a capacidad (v/c); el nivel de servicio, sobre la base de la demora por controles. Ésta incluye la demora inicial por desaceleración, el tiempo para que una cola se ponga en movimiento, la demora por parada y la demora final por aceleración.

Cada grupo de carriles se analiza por separado. La capacidad de la intersección como un todo no se puede calcular, debido a que la

semaforización de la intersección se enfoca en el acomodo de los movimientos vehiculares en los accesos.

La metodología cubre un rango amplio de configuraciones operacionales, incluidos combinación de planes de fases, utilización de carriles, tratamientos alternos de giros a izquierda. Algunas de estas configuraciones pueden considerarse inaceptables por algunas agencias desde el punto de vista de la seguridad.

El aspecto de la seguridad en las intersecciones controladas con semáforo no puede ignorarse. La metodología aplicada no garantiza necesariamente, por sí sola, que esto ocurra. Aquí desempeñan un papel importante el juicio y el criterio del analista.

La entrada y el orden del método de cálculo para las intersecciones controladas con semáforo, se realiza como se esquematiza en la Figura 3.2.

3.1.3.1 Parámetros de entrada

En la Tabla 3.2 se presenta un resumen de la información requerida para realizar un análisis operacional, detallando los datos necesarios, que se agrupan en tres categorías importantes: geometría, tránsito y semaforización.

Condiciones geométricas

La geometría de la intersección generalmente se presenta en diagramas y deberá incluir toda la in-

formación importante: pendientes de los accesos, número y ancho de carriles y condiciones de parqueo. Deberá anotarse la presencia de carriles exclusivos para giros a la izquierda o derecha, junto con las longitudes de almacenamiento.

Condiciones de tránsito

Deberán especificarse los volúmenes de tránsito para cada movimiento en cada acceso. Estos volúmenes son las tasas de flujo en vehículos/hora para el período de análisis de 15 minutos, que es la duración de los períodos típicos de análisis ($T=0.25$ horas). Si no se conocen los datos en los 15 minutos, pueden estimarse usando los factores hora pico (FHP).

La distribución vehicular se cuantifica como el porcentaje de vehículos pesados (%HV) en cada movimiento. El número de buses locales en cada acceso también se debe identificar, incluidos los que paran (a la entrada del acceso o a la salida) a recoger o descargar pasajeros y los que no paran, que se consideran vehículos pesados.

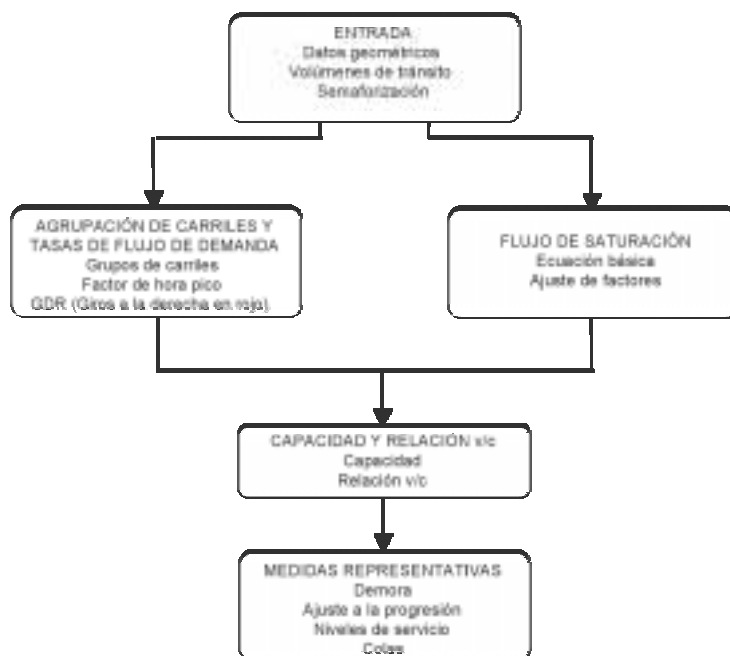


Figura 3.2
Metodología para el análisis de intersecciones controladas con semáforo

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Tabla 3.2
Datos
necesarios
para el análisis
de cada grupo
de carriles

Tipo de condición	Parámetro
Geométricas	Tipo de área
	Número de carriles
	Ancho promedio de carriles, W(m)
	Pendiente, G(%)
	Existencia de carriles exclusivos, LT o RT
	Longitud de bahías, GI o GD, Ls (m)
Tránsito	Parqueo
	Volumen de demanda por movimiento, V (veh/h)
	Tasa de flujo de saturación base, So (vh/h/carril)
	Factor hora pico, FHP
	Porcentaje de vehículos pesados, HV (5)
	Tasa de flujo peatonal en el acceso, Vped (peat/h)
	Buses locales que paran en la intersección, NB (buses /h)
	Actividad de parqueo, Nm (maniobras/h)
	Tipo de llegadas, AT
	Proporción de vehículos que llegan en verde, P
Semaforización	Velocidad de aproximación, SA (Km/h)
	Longitud del ciclo, C (seg.)
	Tiempo verde, G (seg.)
	Amarillo + Todo Rojo, intervalo de cambio y despeje, entreverde, Y (seg)
	Operación accionada o prefijada
	Botón peatonalVerde mínimo peatonal, Gp (seg)
	Plan de fases
	Período de análisis, T (h)

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Se necesita conocer los flujos peatonales y de bicicletas que interfieren en giros permitidos a la izquierda y derecha. Los flujos peatonales y de bicicletas utilizados para analizar un acceso dado, es decir, los flujos en el paso peatonal (cruce) que interfiere en los giros a la derecha del acceso dado. Por ejemplo, para el acceso Este, los flujos peatonales y de bicicletas usados para el análisis son los del cruce peatonal norte.

La calidad de la progresión se describe a través del tipo de llegadas para cada grupo de carriles. En la Tabla 3.3 se definen seis tipos de llegadas.

La relación de pelotón, Rp, se calcula como:

$$R_p = \frac{P}{\frac{g_i}{C}} \quad 3.4$$

donde

P = proporción de todos los vehículos que llegan durante la fase verde

C = duración del ciclo [s]

gi = verde efectivo del grupo de carriles

Condiciones de la semaforización

Se refiere a la información de diagrama de fases que ilustre el plan de fases, longitud del ciclo, tiempos verdes e intervalos entre verdes.

Si existen requerimientos de tiempo para los peatones, el tiempo mínimo de verde para una fase es:

$$G_p = 3,2 + \frac{L}{S_p} + \left(0,81 \frac{N_{\text{peatones}}}{W_E} \right) \quad \text{para } W_E > 3,0m \quad 3.5$$

$$G_p = 3,2 + \frac{L}{S_p} + (0,27 N_{\text{peatones}}) \quad \text{para } W_E \leq 3,0m$$

donde

Tipo de llegadas	Descripción
1	Pelotones densos que llegan al inicio del rojo. Calidad de progresión muy deficiente, como resultado de la optimización de toda la malla.
2	Pelotones moderados que llegan a la mitad del rojo. Progresión desfavorable en calles de dos sentidos.
3	Llegadas aleatorias. Representa la operación en intersecciones aisladas o intersecciones controladas con semáforo no interconectadas, o donde los beneficios de la progresión son mínimos.
4	Pelotones moderados que llegan a la mitad del verde. Progresión favorable en calles de dos sentidos.
5	Pelotones densos que llegan al inicio del verde. Calidad de operación altamente favorable.
6	Progresión excepcional. Pelotones densos que progresan a través de varias intersecciones cortamente espaciadas.

Tabla 3.3
Tipo de llegadas

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

G_p = tiempo mínimo de verde [s]
 L = longitud del cruce peatonal [m]
 S_p = velocidad media del peatón [m/s] (1.2m/s percentil 15)
 W_E = ancho del cruce peatonal [m]
 N_{ped} = número de peatones que cruzan durante un intervalo i

$$V_p = \frac{V}{PHF} \quad 3.6$$

donde

V_p = tasa de flujo durante los 15 minutos pico [veh./h]
 V = volumen horario [veh./h]
 FHP = factor hora pico

Agrupación de carriles

Se debe segmentar la intersección en grupos de carriles, considerando la geometría de la intersección y la distribución de los movimientos vehiculares. En general se utiliza el menor número de grupos de carriles.

La Tabla 3.4 presenta algunos grupos de carriles comunes en intersecciones controladas por semáforo.

Determinación de la tasa de flujo

Los volúmenes de demanda se expresan como volúmenes horarios aforados durante 60 minutos consecutivos. En este caso, a través de los factores hora pico, FHP, se convierten en tasas de flujo de demanda para un período particular de análisis de 15 minutos:

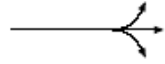
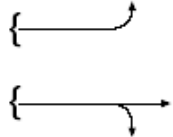
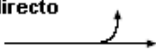
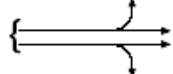
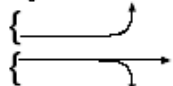
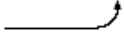
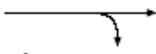
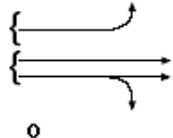
Se deberá utilizar $FHP = 1.0$ si las tasas de flujo se expresan directamente en 15 minutos.

Debido a que no todos los movimientos en la intersección tienen el volumen pico durante el mismo intervalo de 15 minutos, es aconsejable observar directamente los flujos en cada cuarto de hora y seleccionar el período crítico de análisis.

Determinación de la tasa de flujo de saturación

La tasa de flujo de saturación es el flujo de vehículos por hora verde que pueden ser acomodados por el grupo de carriles, suponiendo que la fase verde está disponible todo el tiempo (esto es $g/c=1.0$):

Tabla 3.4
Grupos de
carriles típicos
para análisis

Número de carriles	Movientos por carril	Número de posibles grupo de carriles
1	LT + TH + RT  Izquierdo, directo y derecho	①  Acceso carril sencillo
2	EXC LT  Izquierdo exclusivo TH + RT  Directo y derecho	② 
2	Izquierdo y directo LT + TH  TH + RT  Directo y derecho	①  ② 
3	Izquierdo exclusivo EXC LT  TH  Directo TH + RT  Directo y derecho	②  ③ 

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

$$S = S_o * N * F_w * F_{HV} * F_g * F_p * F_{bb} * F_a * F_{LU} * F_{LT} * F_{RT} * F_{Lpb} * F_{Rpb} \quad 3.7$$

donde

S = tasa de flujo de saturación del grupo de carriles [veh./verde]
 S_o = tasa de flujo de saturación base por carril [veh./h verde/carril]
 N = número de carriles del grupo de carriles
 F_w = factor de ajuste por ancho de carriles
 F_{HV} = factor de ajuste por vehículos pesados
 F_g = factor de ajuste por la pendiente del acceso

F_p = factor de ajuste por parqueo adyacente al grupo

F_{bb} = factor de ajuste por bloqueos de buses que paran dentro del área de la intersección

F_a = factor de ajuste por tipo de área

F_{LU} = factor de ajuste por utilización de carriles

F_{LT} = factor de ajuste por giros a izquierda

F_{RT} = factor de ajuste por giros a la derecha

F_{Lpb} = factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros vehiculares a la izquierda

F_{Rpb} = factor de ajuste por peatones y bicicletas para giros vehiculares a la derecha

Los factores de ajuste se presentan en la Tabla 3.5.

Determinación de la capacidad y de la relación volumen/capacidad

Capacidad

La capacidad en las intersecciones con semáforo se basa en los conceptos de flujo de saturación y proporción de flujo de saturación. La relación de flujo para un grupo de carriles dado está definida como la relación entre la proporción de flujo de demanda actual o futura (v_i) y la proporción de flujo de saturación (s_i). Se indica con el símbolo $(v/s)_i$ para cada grupo de carriles i . La capacidad para un grupo de carriles dado se establece según la ecuación:

$$C_i = S_i \left(\frac{g_i}{C} \right) \quad 3.8$$

donde

C_i = capacidad del grupo de carriles i [veh./h]

S_i = tasa de flujo de saturación del grupo de carriles i [veh./h verde]

g_i/C = relación de verde efectivo para el grupo de carriles i

Relación v/c

La relación entre la proporción de flujo y la capacidad (v/c) se indica con el símbolo X (grado de saturación) en el análisis de la intersección. Para un grupo de carriles i dado, se calcula mediante la ecuación

$$X_i = \frac{V_i}{C_i} = \text{Grado de saturación} \quad 3.9$$

Valores sostenibles de X_i varían entre 0.00 y 1.00 cuando la tasa de flujo iguala la capacidad.

Valores de X_i superiores a 1.00 indican exceso de demanda sobre la capacidad.

Para toda la intersección se debe determinar la relación v/c crítica, X_c , la cual considera solamente los grupos de carriles que tengan la más alta relación de flujo, v/s , para determinada fase.

$$x_c = \frac{C}{C-L} \sum \left(\frac{V}{S} \right)_{ci} \quad 3.10$$

donde

$\sum \left(\frac{V}{S} \right)_{ci}$ = Sumatoria de las relaciones de flujo de todos los grupos de carriles críticos i

L = Tiempo total perdido por ciclo [s]

C = Longitud del ciclo [s]

Determinación de las demoras

Los valores derivados de los cálculos de la demora representan la demora promedio por control experimentada por los vehículos que llegan en el período de análisis, incluidas las demoras que ocurran más allá del período de análisis cuando el grupo de carriles está sobresaturado. La demora por control incluye los movimientos a velocidades lentas y las detenciones en los accesos a la intersección cuando los vehículos se mueven de posición en la fila o disminuyen la velocidad antes de la intersección.

La demora promedio por control por vehículo para cada grupo de carriles se encuentra mediante la Ecuación 3.11. La demora por controles incluye movimientos a velocidades bajas y paradas en los accesos.

$$d = d_l(PF) + d_2 + d_3 \quad 3.11$$

Tabla 3.5
Factores de
ajuste al flujo
de saturación

Factor	Fórmula	Definición de variables	Observaciones
Ancho de carril	$f_w = 1 + \frac{(W - 3.6)}{9}$	W = ancho de carril (m)	W ≥ 2.4 Si W > 4.8, puede considerarse para dos carriles de análisis
Vehículos pesados	$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(E_T - 1)}$	% HV = % de vehículos pesados - grupos de carriles	E _T = 2.0 vehículos equivalente/HV
Pendiente	$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$	% G = % pendiente en el acceso - grupo de carriles	-6 ≤ % G ≤ + 10 Negativo para cuesta abajo
Parqueos	$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18N_m}{3600}}{N}$	N = Número de carriles por grupo N _m = número de maniobras de parqueo/hora	0 ≤ N _m ≤ 180 f _p ≥ 0.050 f _p = 1.000 sin parqueos
Bloqueo de buses	$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_B}{3600}}{N}$	N = Número de carriles en el acceso N _B = número de parada de buses/hora	0 ≤ N _B ≤ 250 f _{bb} ≥ 0.050
Tipo de área	f _a = 0.900 en CBD f _a = 1.000 otras áreas	CBD = Central Business District = Centro de negocios	
Utilización de carril	F _{LU} = v _g / (v _{g1} N)	v _g = proporción de flujo de demanda sin ajustar para el grupo de carriles, en vehículo/hora v _{g1} = proporción de flujo de demanda sin ajustar en el carril único con el volumen más alto en el grupo de carriles, vehículo/hora N = número de carriles en el grupo	
Giros izquierdos	Fase protegida: Carril exclusivo f _{LT} = 0.95 Carril compartido $f_{LT} = \frac{1}{10 + 0.05P_{LT}}$	P _{LT} = proporción de giros izquierdos en el grupo de carriles	Consultar cuadro C16-1 de la página 16-122, del <i>Manual HCM 2000</i> , apéndice C
Giros derechos	Carril exclusivo f _{RT} = 0.85 Carril compartido f _{RT} = 1.0 - (0.15)P _{RT} Carril único f _{RT} = 1.0 - (0.135)P _{RT}	P _{RT} = proporción de giros derechos en el grupo de carriles	f _{RT} ≥ 0.050
Bloqueo por peatones y bicicletas	Ajuste giro izquierdo f _{lpb} = 1.0 - P _{LT} (1 - A _{pbT})(1 - P _{LTA})	P _{LT} = proporción de giros izquierdos en el grupo A _{pbT} = ajuste en la fase permitida P _{LTA} = proporción de giro izquierdo de la fase protegida sobre el total de verde del grupo P _{RT} = proporción de giro derecho en el grupo P _{RTA} = proporción de giro derecho de la fase protegida sobre el verde total	Referirse al apéndice D del <i>Manual HCM 2000</i> , página 16-135, para seguir paso a paso el procedimiento

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

donde

d = demora media por controles [s/veh.]

d_1 = demora uniforme, suponiendo llegadas uniformes [s/veh.]

PF = factor de ajuste por progresión. Tiene en cuenta los efectos de la progresión de los semáforos [s/veh.]

d_2 = demora incremental, que tiene en cuenta el efecto de llegadas aleatorias y colas sobresaturadas durante el periodo de análisis (supone que no existe cola inicial al comienzo del periodo de análisis) [s/veh.]

d_3 = demora por cola inicial, que tiene en cuenta las demoras de todos los vehículos en el período de análisis, debido a colas iniciales antes del período de análisis [s/veh.]

Factor de ajuste por coordinación

Una buena coordinación de semáforos dará como resultado una alta proporción de vehículos que llegan en el verde. Una pobre coordinación dará como resultado una baja proporción de vehículos que llegan en el verde. Este factor de ajuste aplica a todos los grupos de carriles coordinados, incluidos los grupos de carriles con controles de

tiempo fijo y no actuados en los sistemas de control semiactuado. En circunstancias en que se proporciona un control coordinado a grupos de carriles actuados, se puede aplicar este factor a estos grupos de carriles. La coordinación afecta principalmente a la demora uniforme; en consecuencia, se realiza un ajuste sólo a d_1 .

$$PF = \frac{(1-P)F_{PA}}{1 - \frac{g}{c}} \quad 3.12$$

donde

P = proporción de vehículos que llegan en verde

F_{PA} = factor de ajuste suplementario por pelotones que llegan durante el verde

Si se llevan a cabo mediciones de campo, P deberá determinarse como la proporción de los vehículos en el ciclo que llegan a la línea de pare o que se suman a la cola (estática o en movimiento) mientras se despliega la fase verde.

Los valores aproximados de R_p se relacionan con el tipo de la llegada según lo señalado en la Tabla 3.6. Estos valores aproximados se sugieren para el cálculo posterior de la Tabla 3.7.

El valor de PF se puede calcular a partir de valores medidos de P usando los valores dados por f_{PA} . Alternativamente, los valores de la Tabla 3.7 se pueden utilizar para deter-

Tipo de llegada	Rango del pelotón	Valor prefijados (R_p)	Calidad de la progresión
1	≤ 0.50	0.333	Muy deficiente
2	$> 0.50-0.85$	0.667	Desfavorable
3	$> 0.85-1.15$	1.000	Llegadas aleatorias
4	$> 1.15-1.50$	1.333	Favorable
5	$> 1.50-2.00$	1.667	Alta favorabilidad
6	> 2.00	2.000	Excepcional

Tabla 3.6
Relación entre el tipo de llegada y la relación del pelotón

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Tabla 3.7
Factor de
ajuste de
progresión
para el cálculo
de la demora
uniforme

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Relación g/C	Tipo de llegada (AT)					
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5	AT 6
0.20	1.167	1.007	1.000	1.000	0.833	0.750
0.30	1.286	1.063	1.000	0.986	0.714	0.571
0.40	1.445	1.136	1.000	0.895	0.555	0.333
0.50	1.667	1.240	1.000	0.767	0.333	0.000
0.60	2.001	1.395	1.000	0.576	0.000	0.000
0.70	2.556	1.653	1.000	0.256	0.000	0.000
f_{PA}	1.000	0.930	1.000	1.150	1.000	1.000
R_p Prefijado	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000

Nota. $PF = (1 - P)f_{PA}/(1 - G/c)$. Tabulación basada en los valores por defecto de f_{PA} y R_p . $P = R_p * g/C$ (no puede exceder de 1.0). PF no puede exceder de 1.0 para los valores de AT 3 hasta AT 6.

minar el PF en función del tipo de la llegada, basado en los valores prefijados por P (por ejemplo R_{pgi}/C) y f_{PA} asociado a cada tipo de la llegada.

Si el valor de PF se calcula mediante la Ecuación 3.12, su valor puede exceder de 1.0 para el tipo de llegada AT 4 con valores extremadamente bajos de g/C . De manera práctica, para el valor de PF se debe asignar un valor máximo de 1.0 para el tipo de llegada AT 4.

Demora uniforme (d_1)

La Ecuación 3.13 da un estimado de la demora, suponiendo que las llegadas son uniformes en un flujo estable y sin fila inicial. Esta demora se basa en el primer término de la fórmula de demora de Webster y es ampliamente aceptada. Nótese que los valores de X mayores de 1.0 no se utilizan en el cálculo de d_1 .

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{1 - \min(1, x) \frac{g}{c}} \quad 3.13$$

Demora incremental (d_2)

La Ecuación 3.14 estima la demora por incremento debido a las llegadas no unifor-

mes y colapsos temporales de ciclos (demora aleatoria), así como las causadas por períodos sustanciales de sobresaturación (demora de saturación). Es sensible al grado de saturación del grupo de carriles (X), la duración del período de análisis (T), la capacidad del grupo de carriles (c) y el tipo de control del semáforo, que se refleja mediante el parámetro del control (k). En la ecuación se supone que no hay demanda insatisfecha que cause filas iniciales al inicio del período de análisis (T). Finalmente, el término de la demora por incremento es válido para todos los valores de X , incluidos los grupos de carriles altamente sobresaturados. Así se tiene que

$$d_2 = 9200T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad 3.14$$

donde

T = duración del período de análisis,
 $T = 0.25$ h [h]

k = factor de demora incremental que depende del ajuste de los controladores en intersecciones accionadas ($k = 1,0$ para prefijadas)

I = factor de ajuste por entradas de la intersección corriente arriba

Para intersecciones aisladas el valor de $I = 1,00$.

Demora por cola inicial (d_3)

Cuando una cola residual, o remanente, existe antes del período de análisis T , los vehículos experimentan (los que llegan durante T) una demora adicional, debido a que la cola deberá desalojar primero la intersección.

En los casos en que $x > 1.0$ para un período de 15 minutos, el siguiente período empieza por una cola inicial llamada Qb en vehículos. Qb se debe observar al inicio del rojo. Cuando Qb es diferente de cero (o), los vehículos que llegan durante el período de análisis experimentarán una demora adicional por la presencia de la cola inicial.

Una forma generalizada de la demora por formación de la cola, d_3 , se define en la Ecuación 3.15, que proporciona el valor de la demora por vehículo en la cola inicial (en segundos) cuando ésta tiene el tamaño Qb en el comienzo del período de análisis T . La demora d_3 del análisis de demoras es un término que incrementa el valor al presentado en el modelo dado por la Ecuación 3.11, está dado por:

$$d_3 = \frac{1800Qb(1+u)t}{CT} \quad 3.15$$

donde

Qb = cola inicial al principio del período T [veh.]

C = capacidad [veh./h]

T = duración del período de análisis [h]

t = duración de la demanda insatisfecha [h]

u = parámetro de demora

Los parámetros t y u se determinan según sea el caso prevaleciente. La Ecuación

3.16 y la Ecuación 3.17 pueden usarse para estimar los valores de ciertos escenarios, denominados casos III, IV y V.

Los casos I y II ocurren cuando $Qb = 0$, esto es $d_3 = 0$.

Las condiciones para definir los casos III, IV y V, se presentan a continuación:

Caso III: $Qb \neq 0$, Qb se disipa durante T .

$Qb + qT < cT$ qT = demanda total en T , siendo cT la capacidad disponible en T .

Caso IV: $Qb \neq 0$, existe aún demanda insatisfecha (de creciente) al final del período T
 $qT < cT$

Caso V: $Qb \neq 0$, existe aún demanda insatisfecha (creciente) al final de T .

$qT > cT$

$t = 0$ si $Qb = 0$, de otra manera $t \neq 0$ si $Qb \neq 0$. Entonces,

$$t = \min \left\{ T, \frac{Qb}{c[1 - \min(1, x)]} \right\} \quad 3.16$$

donde

X = grado del grupo del carril de saturación, v/c

u = o si $t > T$, de otra manera,

$$u = 1 - \frac{cT}{Qb[1 - \min(1, X)]} \quad 3.17$$

Estimación de la demora total

Es importante establecer la demora no sólo por grupo de carriles o por acceso, sino para toda la intersección. Esta totalización de demoras se hace mediante los promedios de las demoras calculadas para los grupos de carriles que componen un acceso.

Grupo de carriles i :

$$d_i = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad 3.18$$

Para un acceso cualquiera A :

$$d_A = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \quad 3.19$$

donde

d_A = demora para el acceso A [s/veh]

d_i = demora para el grupo i (en el acceso A) [s/veh]

v_i = ajuste del flujo para el grupo de carriles i [veh/h]

Para toda la intersección:

$$d_i = \frac{\sum d_A v_A}{\sum v_A} \quad 3.20$$

donde

d_i = demora por vehículo por intersección [s/veh]

d_A = demora para el acceso A [s/veh],
y

v_A = ajuste del flujo para el acceso A [veh/h]

Determinación del nivel de servicio

El nivel de servicio de una intersección está directamente relacionado con la demora promedio por control por vehículo. Una vez obtenida la demora para cada grupo de carriles y agregada para cada acceso y para la intersección, se determinan los niveles de servicio, consultando la Tabla 3.1.

Si la relación v/c es mayor que 1,00, existen fallas actuales o potenciales que corregir. En estos casos se aconseja el análisis de períodos múltiples. Estos análisis conjugan los periodos en los cuales se presentan filas residuales debido a la sobresaturación.

Si esta relación v/c es menor que 1,00, hay algunos grupos de carriles cuya relación v/c es mayor que 1,00, el tiempo de verde no está proporcionado adecuadamente; por tanto, habrá que mejorar los tiempos de las fases existentes.

Si la relación v/c es mayor que 1,00, los diseños geométrico y de semaforización proporcionan una capacidad inadecuada para los flujos estudiados. Las mejoras que puedan considerarse incluyen:

- ◆ Cambios básicos en la geometría de la intersección (número y uso de carriles).
- ◆ Aumento en la duración del ciclo del semáforo, si se ha determinado que es demasiado corto.
- ◆ Cambios al plan de fases del semáforo.

En algunos casos, la demora será alta aun cuando las relaciones v/c sean bajas. En estas situaciones, las causas son una deficiente coordinación o una inapropiada duración del ciclo. En consecuencia, se puede presentar una intersección con grandes demoras sin que exista un problema de capacidad. Cuando la coordinación es razonable y existen demoras inaceptables, debe examinarse la posibilidad de introducir cambios en el diseño geométrico y la semaforización para aumentar la capacidad. En las relaciones v/c cercanas a 1,00, es posible que la demora permanezca en niveles aceptables. Esto ocurre especialmente cuando el tiempo en el cual se presentan niveles altos de v/c , es corto. También puede ocurrir si se analiza sólo un periodo y existe una fila residual.

En este último caso, debe realizarse un análisis de períodos múltiples para tener un panorama más real de la demora.

El análisis debe considerar los resultados de la capacidad y de los niveles de servicio para comprender todas las operaciones existentes o proyectadas de la intersección. Conociendo la demora, se usa la Tabla 3.1.

Según los resultados obtenidos en el Capítulo 8 del Tomo II, los parámetros que se deben utilizar en intersecciones semaforizadas, calculados con base en información local, se muestran en la Tabla 3.8.

3.2 INTERSECCIONES DE PRIORIDAD CON SEÑAL DE “PARE”

3.2.1 Características físicas y funcionales

Las intersecciones de prioridad forman la vasta mayoría de las intersecciones a nivel en cualquier sistema de vías. Las señales de “pare” y ceda el paso se utilizan para asignar el derecho de paso a una vía. Esta designación obliga a los conductores de la vía controlada a seleccionar espacios entre vehículos del flujo de la vía principal para hacer las maniobras de cruce o de giro. Por ello, la capacidad de los accesos controlados está basada en tres factores:

- ◆ Distribución de espacios entre vehículos en la corriente del tránsito de la vía principal.
- ◆ Discernimiento del conductor para seleccionar espacios entre vehículos para ejecutar la maniobra deseada.
- ◆ Intervalo de entrada requerido por cada vehículo de la cola.

Se presume que los espacios entre vehículos de las corrientes en conflicto están distribuidos aleatoriamente. Por esta razón, el procedimiento descrito será menos confiable en situaciones en que los flujos en conflicto están agrupados muy estrechamente, como en el caso de muchas intersecciones urbanas donde la vía principal es parte de una red semaforizada.

El impacto de la coordinación en la distribución de espacios entre vehículos en una corriente de tránsito principal puede variar sustancialmente. En las arterias de un solo sentido, habrá grandes espacios entre vehículos, en forma periódica entre grupos de vehículos y donde la corriente de tránsito secundario podrá ejecutar sus movimientos con

facilidad. Esta condición puede permitir capacidades mayores y mejores operaciones a la vía secundaria que las llegadas aleatorias supuestas por la metodología de este capítulo.

Parámetro	Valor
Flujo de saturación base	1.880 - 2.015 veh./h/carril
Flujo de saturación buses articulados	692 - 750 veh./h/carril
Tiempo perdido por arranque	1.40 segundos
Tiempos perdidos por despeje	2.40 segundos
Factor de ajuste por obstrucción de buses	12.4 - 12.7 segundos
Factor de ajuste por vehículos pesados	2.85 - 2.97 segundos
Factor de ajuste por maniobra de estacionamiento	5.6 - 6.9 segundos

Tabla 3.8
Parámetros
medio local

Fuente:
elaboración
propia, desarrollo
metodológico Tomo
II, Capítulo 8.

En las arterias de doble sentido, el tránsito de la vía secundaria tendrá que enfrentar a una amplia gama de condiciones. Los grupos de vehículos de la vía principal llegan en los dos sentidos, pudiendo llegar con espacios considerables o en forma escalonada (primero un sentido y después el otro). En el primer caso, los cruces de la vía secundaria serán más fáciles de realizar que en el segundo caso, donde el cruce es prácticamente imposible.

3.2.1.1 Tránsito conflictivo

La naturaleza de los movimientos conflictivos en una intersección no semaforizada es relativamente compleja. Cada movimiento enfrenta un conjunto diferente de conflictos que está directamente relacionado con la naturaleza de los movimientos.

El movimiento de giro derecho desde la vía secundaria, por ejemplo, entra en conflicto sólo con el movimiento directo de la vía

principal en el carril derecho hacia el cual se gira para incorporarse. Adicionalmente, se incluye la mitad del movimiento de giro derecho de la vía principal, porque este movimiento tiene un efecto “inhibidor” de alguna manera. La causa de esta situación puede ser los vehículos que llegan a la intersección por la vía principal sin encender la direccional para girar, ya que el conductor del vehículo que espera en la vía secundaria puede creer que los otros continuarán directo en la intersección.

Los giros izquierdos desde la vía principal entran en conflicto con los flujos totales directos y de giro derecho debido a que éstos deben cruzar el flujo directo y converger con el flujo de giro derecho. El método no distingue entre los conflictos de cruce y de convergencia. Los giros izquierdos desde la vía principal y los giros derechos del flujo principal opuesto se consideran convergencias a pesar del número de carriles en la salida.

Los movimientos directos desde la vía secundaria tienen un conflicto de cruce directo o de convergencia con todos los movimientos de la vía principal, excepto el giro derecho hacia el acceso en estudio. Sólo la mitad de este movimiento se incluye en el cálculo, por las razones analizadas anteriormente.

El giro izquierdo desde la vía secundaria es la maniobra más difícil de ejecutar en una intersección no semaforizada y enfrenta a los flujos conflictivos más complejos. Los volúmenes conflictivos incluyen todos los flujos de la vía principal, además del giro derecho opuesto y el movimiento directo de la vía secundaria.

3.2.1.2 *Tamaño de la brecha crítica, t_g*

La brecha o espacio crítico, t_g , se define como el tiempo medio transcurrido en se-

gundos entre dos vehículos sucesivos en la corriente del tránsito de la vía principal, aceptado por los conductores en el movimiento en estudio que deben cruzar o converger con el flujo de la vía principal. Un conductor cualquiera debería rechazar cualquier brecha menor que la brecha crítica y aceptar cualquier brecha mayor o igual a la brecha crítica.

3.2.1.3 *Tiempo de seguimiento, t_f*

El tiempo transcurrido entre la entrada de un vehículo a la intersección desde la vía secundaria y la entrada del siguiente vehículo, en condiciones de cola continua, se denomina tiempo de seguimiento, t_f .

3.2.1.4 *Capacidad potencial para un movimiento*

La capacidad potencial para el movimiento x , $C_{p,x}$, se define como la capacidad “ideal” para un movimiento específico, suponiendo las siguientes condiciones:

- ♦ El tránsito de las intersecciones cercanas no llega hasta la intersección en estudio.
- ♦ Se provee un carril separado para el uso exclusivo de cada movimiento de la vía secundaria en estudio, y para el giro a la izquierda desde la vía principal.
- ♦ Ningún otro movimiento impide al movimiento en estudio.

3.2.1.5 *Factores de impedancia*

Los vehículos de movimientos de mayor prioridad pueden impedir que los movimientos de prioridad menor utilicen los espacios que se presentan en la corriente del tránsito, reduciendo la capacidad potencial del movimiento. Se supone que el tránsito de la vía

principal no está impedido en ningún momento por los flujos de la vía secundaria, y que la “impedancia” afecta sólo a los vehículos de la vía secundaria. Los giros derechos de la vía secundaria generalmente no impiden los otros movimientos del tránsito, excepto los giros izquierdos desde el acceso opuesto de la vía secundaria, porque ambos movimientos convergen a la misma corriente del tránsito.

Considerando el uso de la prioridad de los espacios, en resumen se tiene que:

- ♦ Los giros izquierdos de la vía principal impiden los movimientos directos y los giros izquierdos desde la vía secundaria.
- ♦ Los movimientos directos de la vía secundaria impiden los giros izquierdos desde la vía secundaria.

3.2.2 Condiciones básicas para el análisis

La metodología específica para las intersecciones controladas por señales de “pare” o ceda el paso en dos de los accesos no se puede emplear en el análisis de intersecciones sin ningún tipo de señalización.

Debido que este procedimiento está basado en el uso de espacios entre vehículos en la corriente del tránsito principal, por los vehículos que cruzan o giran a esa corriente, requiere que el derecho de paso esté claramente asignado y que los movimientos que buscan espacios entre vehículos permanezcan sin cambio.

El procedimiento de análisis está basado en un método alemán publicado originalmente en 1972 y traducido en 1974, el cual fue modificado en Estados Unidos con base en un número limitado de estudios de validación.

El método presume en general que la vía principal no se ve afectada por los flujos de la

vía secundaria. Esta suposición es adecuada para períodos en los cuales la operación es uniforme y sin congestionamiento. Cuando existe un embotellamiento es muy probable que los flujos de la vía principal experimenten algo de impedancia debido al tránsito de la vía secundaria. Se supone que los giros izquierdos de la vía principal se afectan por el flujo opuesto de la vía principal, y que el tránsito de la vía secundaria es afectado por todos los movimientos conflictivos.

La metodología también ajusta la impedancia adicional entre los flujos de la vía secundaria y la del uso compartido de carriles por los dos o tres movimientos de la vía secundaria.

Para considerar apropiadamente las impedancias mutuas, el método se basa en un régimen priorizado de uso de espacios entre vehículos. Éstos son utilizados por un número de flujos concurrentes en el flujo vehicular de la vía principal. Un espacio usado por un vehículo de uno de estos flujos no estará disponible para otro vehículo. Los espacios son utilizados por los vehículos en el siguiente orden de prioridad:

- ♦ Prioridad 1. Giros derechos de la vía secundaria.
- ♦ Prioridad 2. Giros izquierdos de la vía principal.
- ♦ Prioridad 3. Movimientos directos de la vía secundaria.
- ♦ Prioridad 4. Giros izquierdos de la vía secundaria.

Por ejemplo, si un vehículo que va a girar a la izquierda desde la vía principal y un vehículo de la vía secundaria que va a seguir directo están esperando cruzar la corriente del tránsito principal, el primer espacio disponible (de tamaño adecuado) será utilizado por el vehículo que dé giro izquierdo. El vehículo directo de la vía secundaria deberá

esperar el segundo espacio disponible. En suma, un gran número de vehículos de giro izquierdo podrán usar tantos espacios disponibles que los vehículos directos de la vía secundaria están fuertemente impedidos o imposibilitados para hacer movimientos de cruce seguros.

Se presume que los vehículos de giro derecho desde la vía secundaria no van a utilizar todos los espacios disponibles. Debido a que estos vehículos convergen a los espacios en el carril del lado derecho de la corriente hacia la cual giraron, requieren solamente un espacio en ese carril, no en el flujo total de la vía principal. Un espacio en el tránsito de la vía principal podrá ser usado por otro vehículo simultáneamente. Por esta razón, el método presume que los giros derechos de la vía secundaria no impi-

den que cualquier otro flujo use los espacios que se presenten en la vía principal.

3.2.3 Metodología

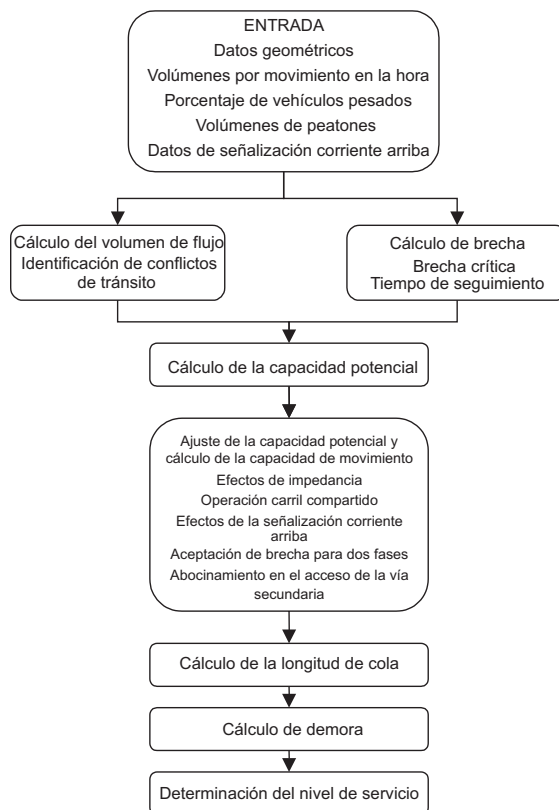
Inicialmente el método implica definir las condiciones geométricas y de volúmenes en la intersección en estudio, así como determinar el “tránsito conflictivo” en el cual debe cruzar cada movimiento de la vía secundaria y el movimiento de giro izquierdo de la vía principal.

También se puede establecer el tamaño del espacio aceptable en la corriente del tránsito conflictivo que requieren los vehículos en cada movimiento para cruzar la corriente del tránsito conflictivo.

Es necesario conocer la capacidad de los espacios en la corriente del tránsito principal para acomodar cada uno de los movimientos en estudio que utilizarán estos espacios.

Finalmente se deben ajustar las capacidades encontradas por concepto de la impedancia y el uso de los carriles compartidos.

Figura 3.3
Metodología
para el análisis
de
intersecciones
de prioridad



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

3.2.3.1 Nivel de servicio

Los niveles de servicio se definen según los valores expresados en la Tabla 3.9, los cuales se encuentran en función de la demora total promedio, definida como el tiempo total transcurrido desde cuando un vehículo se detiene al final de la cola hasta que el vehículo logra entrar a la intersección. Este tiempo incluye el tiempo requerido por el vehículo para pasar del extremo final de la cola a la primera posición. La demora total promedio para cualquier movimiento secundario está en función de la capacidad del acceso y del grado de saturación. En situaciones en que el grado de saturación es mayor de 0.9, la magnitud de la demora pro-

medio por vehículo depende además de la duración del período de análisis.

La entrada y el orden del método de cálculo para las intersecciones de prioridad con señal de “PARE”, se realiza como se esquematiza en la Figura 3.3.

3.2.3.2 Parámetros de entrada

Se necesitan descripciones detalladas de la geometría, los volúmenes y los controles en la intersección. A continuación se relacionan los principales datos que se requieren para el análisis de la capacidad.

- ◆ Número y uso de carriles.
- ◆ Canalización.
- ◆ Pendientes de accesos, en porcentaje.
- ◆ Ángulo de intersección del acceso secundario y radio en la esquina para el giro a derecha.
- ◆ Distancia de visibilidad.
- ◆ Volúmenes de tránsito clasificados por movimiento y tipo de vehículo.
- ◆ Velocidad promedio de recorrido en la vía principal y en tramos previos a la intersección.
- ◆ Existencia de abocinamiento en los accesos de las vías secundarias.

Cada uno de estos factores tiene un impacto significativo en el uso de los espacios y el tamaño del espacio requerido para los distintos movimientos. Las distancias de visibilidad, los radios en la esquina y el ángulo del acceso pueden ser determinados en forma aproximada. El número y uso de los carriles es un factor importante. Los vehículos en los carriles adyacentes pueden utilizar un mismo espacio de la corriente del tránsito simultáneamente (a menos que sean impedidos por un usuario conflictivo en el espacio).

Nivel de servicio	Demora promedio (seg/veh)
A	0 - 10
B	> 10 - 15
C	> 15 - 25
D	> 25 - 35
E	> 35 - 50
F	> 50

Tabla 3.9

Descripción de los niveles de servicio para intersecciones de prioridad

Fuente:

Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Cuando los movimientos comparten carriles, sólo un vehículo de esos movimientos podrá usar cada espacio. La canalización es importante porque puede utilizarse para reducir la impedancia separando los flujos conflictivos entre sí.

Los volúmenes deben especificarse por movimiento. Se utilizan volúmenes horarios en el análisis debido a que las fluctuaciones en períodos cortos generalmente no presentan mayores dificultades. Sin embargo, el analista puede escoger el considerar valores de flujo del intervalo de los 15 minutos máximos dividiendo todos los volúmenes entre el factor horario de máxima demanda antes de iniciar los cálculos. El volumen por movimiento i se designa como V_i . En casos en que se utilizan los valores de flujo, la denominación es la misma, pero se refiere a valor de flujo en vez de volumen.

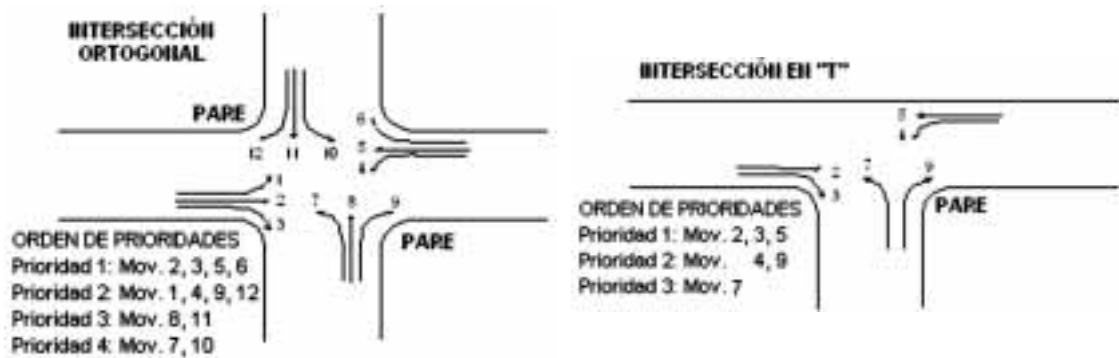
Por conveniencia, se utiliza del 1 al 6 para definir los movimientos de la vía principal, y del 7 al 12 para definir los movimientos de la vía secundaria, como se muestra en la Tabla 3.10.

3.2.3.3 Tránsito conflictivo

En la Tabla 3.10 se indica la formulación que permite determinar los volúmenes de los movimientos conflictivos de una intersección de prioridad.

Figura 3.4
Esquema de los movimientos en una intersección regulada con señal de "pare"

Fuente:
elaboración propia



3.2.3.4 Determinación del tamaño de la brecha crítica, t_c

La brecha crítica depende de un número de factores, entre los cuales se tiene:

- ◆ El tipo de maniobra a ejecutar.
- ◆ El tipo de control de la vía secundaria (alto o ceda el paso).
- ◆ La velocidad promedio de marcha en la vía principal.
- ◆ El número de carriles de la vía principal.
- ◆ Las condiciones geométricas y del medio ambiente de la intersección.

La brecha crítica se calcula por separado para cada movimiento secundario de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV}P_{HV} + t_{c,G}G - t_{c,T} - t_{3,LT} \quad \mathbf{3.21}$$

donde

$t_{c,x}$ = brecha crítica por movimiento x [en segundos]

$t_{c,base}$ = brecha crítica base tomada de la Tabla 3.11

$t_{c,HV}$ = factor de ajuste por vehículos pesados (1.0 para vías secundarias de dos carriles y 2.0 para vías secundarias de cuatro carriles) [en segundos]

P_{HV} = proporción de vehículos pesados del movimiento secundario

$t_{c,G}$ = factor de ajuste por pendiente (0,1 para los movimientos 9 y 12, y de 0,2 para los movimientos 7, 8, 10 y 11) [en segundos]

G = pendiente en porcentaje, dividido entre 100

$t_{c,T}$ = factor de ajuste para los movimientos 7, 8, 10 y 11, los cuales enfrentan dos estados correspondiente a los dos sentidos de la vía principal (1.0 para dichos movimientos; 0.0 si es sólo para un estado) [en segundos]

$t_{3,LT}$ = factor de ajuste para la geometría de la intersección (0.7 para los movimientos izquierdos de la vía secundaria en intersecciones de hasta tres brazos; 0.0 para intersecciones de otras características) [en segundos]

3.2.3.5 Determinación del tiempo de seguimiento, t_f

El tiempo transcurrido entre la entrada de un vehículo a la intersección desde la vía secundaria y la entrada del siguiente vehículo, en condiciones de cola continua, se denomina tiempo de seguimiento, t_f .

Los valores de t_c y t_f para vehículos ligeros se determinan de la Tabla 3.11, los cuales

Movimiento prioritario	Movimientos conflictivos del tránsito, $V_{c,x}$	
Vía principal movimiento izquierdo (1, 4)	$V_{c,1} = v_5 + v_6^{[a]} + v_{16}$	$V_{c,4} = v_2 + v_3^{[a]} + v_{15}$
Vía secundaria giro derecho (9, 12)	$V_{c,9} = \frac{v_2^{[b]}}{N} + 0.5v_3^{[c]} + v_{14} + v_{15}$	$V_{c,12} = \frac{v_5^{[b]}}{N} + 0.5v_6^{[c]} + v_{13} + v_{16}$
Vía secundaria movimiento directo (8, 11)	Fase I $V_{c,I,8} = 2v_1 + v_2 + 0.5v_3^{[c]} + v_{15}$	$V_{c,I,11} = 2v_4 + v_5 + 0.5v_6^{[c]} + v_{16}$
	Fase II $V_{c,II,8} = 2v_4 + v_5 + v_6^{[a]} + v_{16}$	$V_{c,II,11} = 2v_1 + v_2 + v_3^{[a]} + v_{15}$
Vía secundaria giro izquierda (7, 10)	Fase I $V_{c,I,7} = 2v_1 + v_2 + 0.5v_3^{[c]} + v_{15}$	$V_{c,I,10} = 2v_4 + v_5 + 0.5v_6^{[c]} + v_{16}$
	Fase II $V_{c,II,7} = 2v_4 + \frac{v_5}{N} + 0.5v_6^{[d]} + 0.5v_{12}^{[e]} + 0.5v_{11} + v_{13}$	$V_{c,II,10} = 2v_1 + \frac{v_2}{N} + 0.5v_3^{[d]} + 0.5v_9^{[e]} + 0.5v_8 + v_{14}$

Nota. a. Si el giro derecho que viene de la vía principal está separado por una isla triangular y tiene una señal de ceda el paso o de pare, v_6 y v_3 no necesitan considerarse; b. Si existe más de un carril en la vía principal, se supone que la tasa de flujo en el carril derecho es v_2/N o v_5/N , donde N es el número de carriles; c. Si existe un giro derecho en la vía principal, no es necesario considerar v_3 o v_6 ; d. Omitir el v3, giro derecho, más lejano para el movimiento 10, o v_6 para el movimiento 7, si la calle principal es multicarril; e. Si el giro derecho que viene de la vía secundaria está separada por una isla triangular y tiene señal de ceda el paso o de pare, v_9 y v_{12} no necesitan considerarse; f. Omitir v_9 y v_{12} para multicarriles o utilizar la mitad de su valor, si el acceso de la vía secundaria presenta abocinamiento.

Tabla 3.10
Definición y cálculo de los volúmenes de los movimientos conflictivos

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Tabla 3.11
Brecha crítica
base y
tiempo de
seguimiento
base
Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Movimiento	Brecha crítica base, $t_{c,base}$ (s)		Tiempo de seguimiento base, $t_{f,base}$ (s)
	Vía principal con dos carriles	Vía principal con cuatro carriles	
Giro izquierdo desde la vía principal	4.1	4.1	2.2
Giro derecho desde la vía secundaria	6.2	6.9	3.3
Tránsito directo en la vía secundaria	6.5	6.5	4.0
Giro izquierdo desde la vía secundaria	7.1	7.5	3.5

se han obtenido a partir de estudios empíricos realizados en sitios donde la velocidad promedio en los accesos a la intersección por la vía principal es 50 km/h.

El tiempo de seguimiento se calcula para cada movimiento de la vía secundaria, a partir de la Ecuación 3.22.

$$t_{f,x} = t_{f,base} + t_{f,HV}P_{HV} \quad \mathbf{3.22}$$

donde

$T_{f,x}$ = tiempo de seguimiento para la vía secundaria [s]

$T_{f,base}$ = tiempo de seguimiento base de acuerdo a Tabla 1.43

$T_{f,HV}$ = factor de ajuste por vehículos pesados (0.9 para vías secundarias de dos carriles y 1.0 para vías principales de cuatro carriles)

P_{HV} = proporción de vehículos pesados del movimiento secundario

Los valores presentados en la Tabla 3.11 son considerados típicos. Si los valores para t_c y t_f son pequeños, la capacidad aumenta. Si los valores para t_c y t_f son altos, la capacidad disminuye. Si se toman en terreno la brecha crítica y el tiempo de seguimiento, las estimaciones de la capacidad serán más exactas.

Para accesos multicarriles, se deberá realizar una medida en campo para poder determinar el valor de la brecha crítica por movimiento según el volumen medido en cada sitio. Estos accesos tienen grandes valo-

res para la brecha crítica en giros derechos de vía secundaria (6.9 s), comparados con los valores de los movimientos directos de las vías secundarias (6.5 s).

3.2.3.6 Determinación de la capacidad potencial

La capacidad potencial en vehículos equivalentes por hora (UCP/h) se selecciona a partir de la Ecuación 3.23.

$$C_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-v_{c,x}t_{c,x}/3600}}{1 - e^{-v_{c,x}t_{f,x}/3600}} \quad \mathbf{3.23}$$

donde

$C_{p,x}$ = capacidad potencial por movimiento de la vía secundaria [veh./h]

$v_{c,x}$ = volumen de flujo por movimiento conflictivo [veh./h]

$t_{c,x}$ = brecha crítica (por ejemplo, el mínimo tiempo que permite entrar un vehículo a la intersección desde una corriente secundaria) por movimiento de una vía secundaria [s]

$t_{f,x}$ = tiempo de seguimiento (por ejemplo, tiempo entre el despeje de un vehículo desde la vía secundaria y el despeje del próximo bajo condiciones de cola) para un movimiento de la vía secundaria [s]

En la Figura 3.5 y la Figura 3.6, se entra por el eje horizontal con el valor del volumen conflictivo V_c y se traza una línea vertical hasta la curva que representa el movimiento secundario en estudio, y por este punto se traza una línea horizontal hasta el eje vertical, donde se lee la capacidad del movimiento secundario en vehículos equivalentes por hora por carril (UCP/h).

También se pueden obtener en forma directa la brecha crítica t_c y el intervalo de seguimiento t_f aplicando la Ecuación 3.23, en función del tránsito conflictivo v_c .

- ♦ Los movimientos de prioridad 1 y 2 no presentan reducción por efectos de impedancia; por tanto, la capacidad de cada movimiento $C_{m,j}$ es igual a la capacidad potencial $c_{p,j}$ dada por la expresión de la Ecuación 3.23.
- ♦ Los movimientos secundarios de prioridad 3 deben ceder el paso no sólo a los movimientos de la corriente principal, sino también al movimiento de giro a izquierda desde la vía principal, que es de prioridad 2. Por tanto, no todas las brechas de longitud aceptable que se

3.2.3.7 Factores de impedancia

Impedancia en vehículos

El impacto de la impedancia se logra multiplicando la capacidad potencial de un movimiento $C_{p,i}$ por una serie de factores de impedancia p' y p'' para cada movimiento impedido "j". El resultado obtenido al considerar los factores de impedancia es la capacidad por movimiento $C_{m,j}$, la cual es una capacidad ajustada del movimiento en estudio, suponiendo que el movimiento tiene uso exclusivo de un carril separado.

Los factores de impedancia p' están basados sólo en el porcentaje de la capacidad potencial del movimiento impedido usado por la demanda existente.

De acuerdo con lo anterior, se tiene:

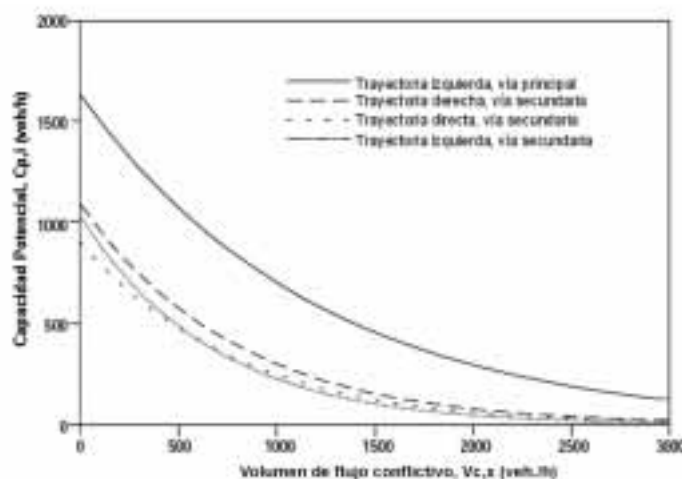


Figura 3.5
Capacidad potencial para vías de dos carriles

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

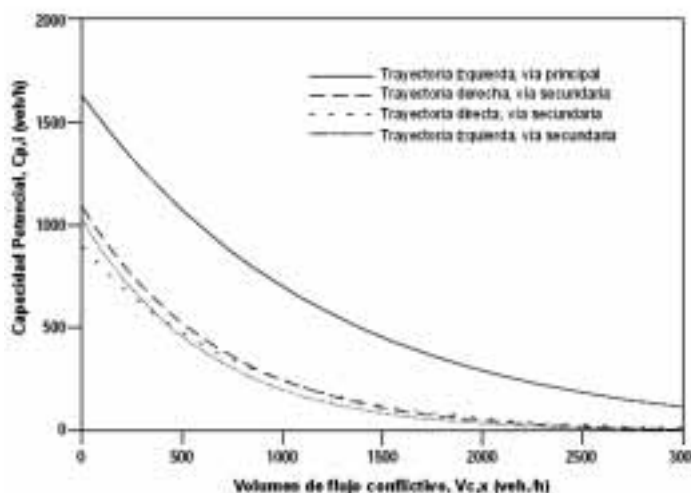


Figura 3.6
Capacidad potencial para vías de cuatro carriles

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

presentan en la intersección están normalmente disponibles para ser usadas por los movimientos de prioridad 3, ya que algunas las usan los movimientos de giro a la izquierda. La magnitud de esta impedancia depende de la probabilidad de que los vehículos que giran a la izquierda desde la vía principal estén esperando una brecha aceptable al mismo tiempo que los vehículos de prioridad 3.

Por tanto, la probabilidad que el movimiento de giro a izquierda desde la vía principal pueda realizar la maniobra en estado de cola libre está dada por la expresión:

$$p_{o,j} = 1 - \frac{v_j}{c_{m,j}} \quad 3.24$$

donde

$j =$ denota los movimientos 1,4 de giro a izquierda desde la vía principal de prioridad 2

La capacidad de movimiento $c_{m,k}$ para todos los movimientos de prioridad 3 depende del cálculo de los factores de ajuste de la capacidad que cuantifican los efectos de impedancia de los movimientos de mayor jerarquía. Estos factores f_k , para todos los movimientos “k” y los movimientos de prioridad 3, se pueden expresar como se muestra en la Ecuación 3.25:

$$f_k = \prod_j p_{o,j} \quad 3.25$$

donde

$p_{o,j} =$ probabilidad de que el movimiento conflictivo j de prioridad 2 esté operando en estado de cola libre

$k =$ denota sólo los movimientos de prioridad 3

Por tanto, la capacidad de movimiento para los movimientos de prioridad 3 se puede calcular con la expresión:

$$c_{m,x} = (c_{p,k}) f_k \quad 3.26$$

donde

$k =$ denota los movimientos de prioridad 3

$f_k =$ factor de ajuste de la capacidad para los movimientos k

Los movimientos de prioridad 4 (es decir, los giros a la izquierda desde la vía secundaria en intersecciones de 4 ramas) presentan una capacidad potencial que se reduce por efecto de las colas de los siguientes tres movimientos de prioridad superior:

- ◆ Giro a la izquierda desde la vía principal (prioridad 2).
- ◆ Movimientos directos desde la vía secundaria (prioridad 3).
- ◆ Movimientos de giros a derecha desde la vía secundaria (prioridad 2).

En consecuencia, la probabilidad de que cada uno de los movimientos de prioridad superior opere en estado de cola libre es básica para determinar los efectos de impedancia en la capacidad del movimiento de giro a izquierda desde la vía secundaria.

Es de aclarar que no todas las probabilidades son independientes entre sí. Específicamente, la cola del movimiento de giro a izquierda desde la vía principal tiene un efecto en la probabilidad de un estado de cola libre que se presenta para el movimiento directo desde la vía secundaria. El producto de estas dos probabilidades permite sobreestimar los efectos de impedancia de estos dos movimientos en el movimiento de giro a izquierda desde la vía secundaria.

La Figura 3.7 se puede emplear para ajustar la sobreestimación causada por la de-

pendencia estadística entre las colas de las corrientes de prioridad 2 y 3. La elaboración de la curva de esta figura está basada en trabajos empíricos y teóricos desarrollados en Alemania, cuya representación matemática validada por simulación, es:

$$p' = 0,65 p'' - \frac{p''}{p'' + 3} + 0,6\sqrt{p''} \quad 3.27$$

$$p'' = (p_{o,j})(p_{o,k})$$

donde

p' = ajuste del factor de impedancia entre los movimientos de giro a izquierda desde la vía principal y el movimiento directo desde la vía secundaria

$p_{o,j}$ = probabilidad de estado de cola libre para el movimiento conflictivo de giro a izquierda desde la vía principal

$p_{o,k}$ = probabilidad de estado de cola libre para el movimiento conflictivo directo desde la vía secundaria

En la Figura 3.7 se entra por el eje de la "x" con el valor de p'' definido en la Ecuación 3.27, se traza una línea vertical hasta la curva, y luego una línea horizontal para determinar el factor p' . Por consiguiente, el valor del factor de ajuste de la capacidad para el movimiento de giro a izquierda desde la vía secundaria se determina con base en la ecuación:

$$f_l = (p')(p_{o,j}) \quad 3.28$$

Nota: Para giros izquierdos de la vía principal y de la trayectoria directa de la vía secundaria.

donde

l = denota el movimiento de giro a izquierda de prioridad 4 (es decir los movimientos 7 y 10 de la Figura 3.4)

j = denota los movimientos conflictivos de giro a derecha desde la vía secundaria (es decir, los movimientos 9 y 12 de la Figura 3.4)

Finalmente, la capacidad de movimiento para los giros a izquierda desde la vía secundaria se determina de la siguiente manera:

$$c_{m,l} = (f_l)(c_{p,l}) \quad 3.29$$

donde

l = denota los movimientos de prioridad 4

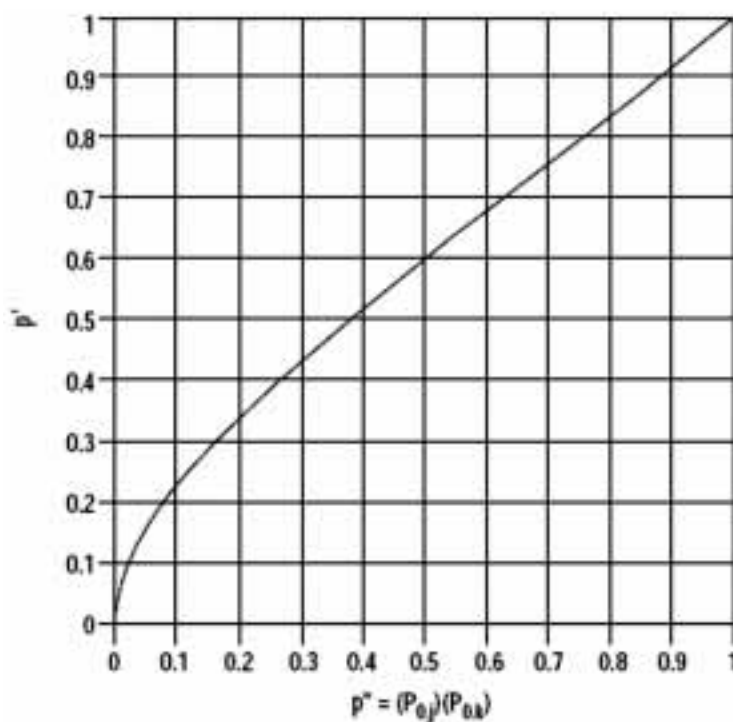


Figura 3.7
Ajuste del factor de impedancia

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Los movimientos de prioridad 4 ocurren únicamente en intersecciones de cuatro brazos. De la Ecuación 3.27 a la Ecuación 3.29 se aplican únicamente cuando se evalúan intersecciones de cuatro brazos.

Impedancia en peatones

En la vía secundaria el flujo de vehículos debe ceder el paso al flujo de peatones. En la Tabla 3.12 se muestra la jerarquía relativa entre las corrientes peatonales y de vehículos usada en esta metodología. El cálculo del factor para la obstrucción por peatones se realiza mediante la Ecuación 3.30 con base en el volumen peatonal, la velocidad del peatón y el ancho del carril.

Tabla 3.12
Relación
jerárquica
peatón /
vehículo

Fuente: Manual
de capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Flujo vehicular	Debe ceder el paso al flujo peatonal	Factor de impedancia por peatones, $p_{p,x}$
V_1	V_{16}	$P_{p,16}$
V_4	V_{15}	$P_{p,15}$
V_7	V_{15}, V_{13}	$(p_{p,15})(p_{p,13})$
V_8	V_{15}, V_{16}	$(p_{p,15})(p_{p,16})$
V_9	V_{15}, V_{14}	$(p_{p,15})(p_{p,14})$
V_{10}	V_{16}, V_{14}	$(p_{p,16})(p_{p,14})$
V_{11}	V_{15}, V_{16}	$(p_{p,15})(p_{p,16})$
V_{12}	V_{16}, V_{13}	$(p_{p,16})(p_{p,13})$

$$f_{pb} = \frac{(v_x) \left(\frac{w}{S_p} \right)}{3600} \quad 3.30$$

donde

- f_{pb} = factor de obstrucción peatonal o proporción de tiempo en que durante una hora es bloqueado el acceso de un carril
- v_x = número de peatones por grupo, donde el movimiento 13, 14, 15 o 16
- w = ancho de carril [m]

S_p = velocidad de marcha del peatón, puede suponerse en 1.2 m/s

El factor de impedancia por peatones para el movimiento peatonal x , $p_{p,x}$, se calcula mediante la ecuación:

$$p_{p,x} = 1 - f_{pb} \quad 3.31$$

Si en el paso peatonal hay una pendiente significativa, $p_{p,x}$ se incluye como un factor en la Ecuación 3.25 y en la Ecuación 3.28. La primera quedará entonces:

$$f_k = \prod_j (p_{o,j}) p_{p,x} \quad 3.32$$

donde $p_{p,x}$ toma el valor en la Ecuación 3.28 de la siguiente manera:

$$f_l = (p')(p_{o,j})(p_{p,x}) \quad 3.33$$

donde $p_{p,x}$ toma el valor de $p_{p,13}$ $p_{p,15}$ para el flujo 7, y $p_{p,14}$ $p_{p,16}$ para el flujo 10.

3.2.3.8 Determinación de la capacidad del carril compartido

Hasta este punto, la metodología considera que cada movimiento de la vía secundaria usa el carril en exclusividad. A menudo, este no es el caso, y frecuentemente dos o tres movimientos comparten un solo carril en el acceso secundario. Cuando esto ocurre, los vehículos de los diferentes movimientos no tienen acceso simultáneo a los espacios ni más de un vehículo de los movimientos compartidos puede utilizar el mismo espacio.

Ocasionalmente, una intersección con una esquina de radio amplio permite a los vehículos acercarse al extremo del mismo carril y situarse al lado. Esto reduce o elimina el impacto adverso del carril compartido. Donde varios movimientos compartidos en el mismo carril no se pueden parar uno al lado del otro en la línea de parada de la intersec-

ción, se emplea la siguiente ecuación para calcular la capacidad del carril compartido:

$$c_{SH} = \frac{v_l + v_t + v_r}{\left(\frac{v_l}{c_{m,l}}\right) + \left(\frac{v_t}{c_{m,t}}\right) + \left(\frac{v_r}{c_{m,r}}\right)} \quad 3.34$$

donde

c_{SH} = capacidad del carril compartido [Veh. Equiv./h]

v_l = volumen o flujo vehicular para el movimiento de giro izquierdo en el carril compartido [Veh. Equiv./h]

v_t = volumen o flujo vehicular para el movimiento directo en el carril compartido [Veh. Equiv./h]

v_r = volumen o valor de flujo para el movimiento de giro derecho en el carril compartido [Veh. Equiv./h]

$c_{m,l}$ = capacidad del movimiento de giro izquierdo en el carril compartido [Veh. Equiv./h]

$c_{m,t}$ = capacidad del movimiento directo en el carril compartido [Veh. Equiv./h]

$c_{m,r}$ = capacidad del movimiento de giro derecho en el carril compartido [Veh. Equiv./h]

Sólo los movimientos incluidos en el carril compartido se incluyen en la ecuación. Si el carril compartido sólo incluye los movimientos directos y de giro derecho, tanto el numerador como el denominador para el movimiento de giro izquierdo se deben eliminar de la ecuación.

Es importante resaltar que la metodología implícitamente asume que existe un carril exclusivo para el giro a la izquierda desde la vía principal. En los sitios donde no exista carril exclusivo para dicho movimiento, es

posible que tanto el movimiento directo como el giro a la derecha desde el mismo acceso presenten demoras ocasionadas por los vehículos que esperan una brecha aceptable para girar a la izquierda. Para cuantificar esta probabilidad se pueden emplear los factores $p_{o,1}^*$ y $p_{o,4}^*$, los cuales indican la probabilidad de que no exista cola en los respectivos carriles compartidos, y se calculan mediante la ecuación:

$$p_{o,j}^* = \frac{1 - p_{o,j}}{1 - \left[\frac{V_{i2}}{S_{i1}} + \frac{V_{i2}}{S_{i2}} \right]} \quad 3.35$$

donde

j = denota movimientos 1.4 de giro a izquierda desde la vía principal

$i_1 d$ = movimientos 2.5 directos desde la vía principal

i_2 = denota movimientos 3.6 de giro a la derecha desde la vía principal

s_{i1} = flujo de saturación para los movimientos directos de la vía principal, en vehículos por hora. (Este parámetro se puede medir en campo)

s_{i2} = flujo de saturación para los movimientos de giro a derecha desde la vía principal, en vehículos por hora. (Este parámetro se puede medir en campo)

$V_{i,2} = 0$ si existe carril exclusivo para giro a la derecha desde la vía principal

Los factores $p_{o,1}^*$ y $p_{o,4}^*$ se deben reemplazar por los factores $p_{o,1}$ y $p_{o,4}$ en la Ecuación 3.24 para tener en cuenta el efecto adicional por la cola que se genera en el carril de la vía principal, que es compartido por los vehículos que giran a la izquierda, siguen directo o giran a la derecha.

3.2.3.9 Determinación del nivel de servicio

Los niveles de servicio se definen según los valores expresados en la Tabla 3.9, los cuales se encuentran en función de la demora total promedio, definida como el tiempo total transcurrido desde cuando un vehículo se detiene al final de la cola hasta que el vehículo logra entrar en la intersección. Este tiempo incluye el tiempo requerido por el vehículo para pasar del extremo final de la cola a la primera posición. La demora total promedio para cualquier movimiento secundario está en función de la capacidad del acceso y del grado de saturación. En situaciones donde el grado de saturación es mayor de 0.9, la magnitud de la demora promedio por vehículo depende además de la duración del período de análisis. Para un período de análisis de 15 minutos, la demora total promedio se puede estimar a partir de la Ecuación 3.36.

$$d = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \quad K + 5 \quad 3.36$$

$$K = \left[\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}} \right) \left(\frac{v_x}{c_{m,x}} \right)}{450T}} \right]$$

donde

d = demora total promedio [s/veh]

v_x = volumen del movimiento x [veh Equiv/h]

$c_{m,x}$ = capacidad del movimiento x [veh Equiv/h]

T = período de análisis ($T=0.25$ para un período de 15 minutos) [h]

Esta ecuación se presenta en forma gráfica en la Figura 3.8, para diferentes capacidades y un período de análisis de 15 minutos.

La demora total en la intersección está dada por la expresión

$$D_I = \frac{\sum_{j=1}^4 (D_{A,j}) (V_{A,j})}{\sum_{i=1}^{12} V_i} \quad 3.37$$

donde

j = denota el número del acceso

i = denota el número del movimiento

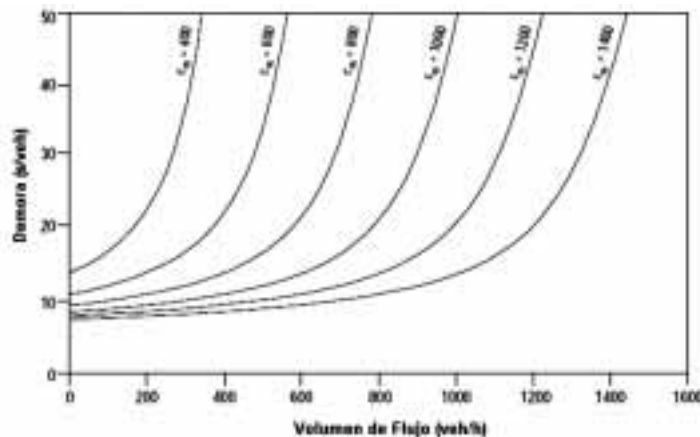
D_I = demora total promedio en la intersección [s/veh.]

$D_{A,j}$ = demora total promedio en el acceso j [s/veh]

$V_{A,j}$ = volumen total en el acceso j [Veh. Equiv./ h]

V_i = volumen del movimiento i [Veh. Equiv./ h]

Figura 3.8
Demora total
y volumen
de flujo



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM 2000)

Según los resultados del Capítulo 8 del Tomo II, a continuación se presenta un resumen de los valores de los parámetros obtenidos para este tipo de intersecciones, calculados con base en información local.

En la Tabla 3.13 se presenta el resumen de los valores obtenidos en este estudio, junto con los valores obtenidos en el

Tipo de Maniobra	Brecha crítica t_g (Seg)		
	Manual - 2005	Manual - 1998	HCM-2000
Giro a la derecha , vía secundaria	4.1	3.6	6.2
Movimiento directo, vía secundaria	4.6	4.2	6.5

Tabla 3.13 Brecha crítica T_g para intersecciones de prioridad reguladas con señales de “pare”

Fuente: elaboración propia.

manual de 1998 y los presentados en el HCM-2000.

Para los tiempos de seguimiento, se trabajó con la mediana de los datos analizados estadísticamente, para cada uno de los movimientos secundarios estudiados. En la Tabla 3.14 se presentan los tiempos de seguimiento en cada una de la intersecciones estudiadas (Capítulo 8, Tomo II), el conjunto de datos, los tiempos calibrados en el manual de 1998 y los tiempos de seguimiento presentados en el HCM-2000.

Con base en los tiempos estimados en estas dos tablas, se construyeron las curvas de capacidad potencial para cada uno de los movimientos estudiados en diferentes volúmenes del tránsito en conflicto. En la Figura 3.9 y la Figura 3.10 se presentan las curvas para cada movimiento, de acuerdo con los datos obtenidos.

En la Figura 3.11 se muestra un resumen de las curvas de capacidad potencial para dos de los movimientos secundarios en

intersecciones de prioridad reguladas con señales de “pare”, estudiados para el caso Bogotá.

3.3 GLORIETAS

En este capítulo se presentan diferentes metodologías para realizar análisis de capacidad y de calidad de servicio en intersecciones giratorias o glorietas, según el *Manual de capacidad de carreteras* (HCM-2000) y otros métodos.

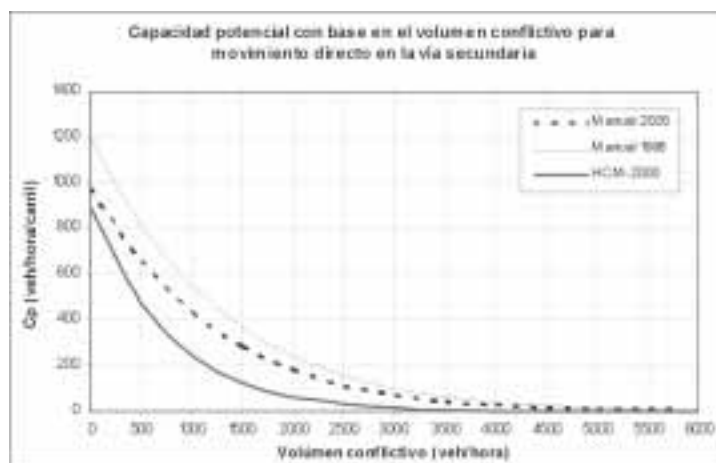


Figura 3.9 Curvas de capacidad potencial para giro a la derecha en vía secundaria

Fuente: elaboración propia

Tipo de maniobra	Tiempo de seguimiento t_f (seg)					
	Manual 2005				Manual 1998	HCM-2000
	CI 43A - Cra 68B	CI 22B - Cra 60	CI 142 - Cra 22	Conjunto de datos		
Giro a la derecha, vía secundaria	2.5	3.2	3.9	3.6	2.8	3.3
Movimiento directo, vía secundaria	3.1	5.0	3.9	3.7	3.0	4.0

Tabla 3.14 Tiempos de seguimiento (T_f) para intersecciones de prioridad reguladas con “pare”

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.10
Curvas de capacidad potencial para movimiento directo en vía secundaria

Fuente:
elaboración propia

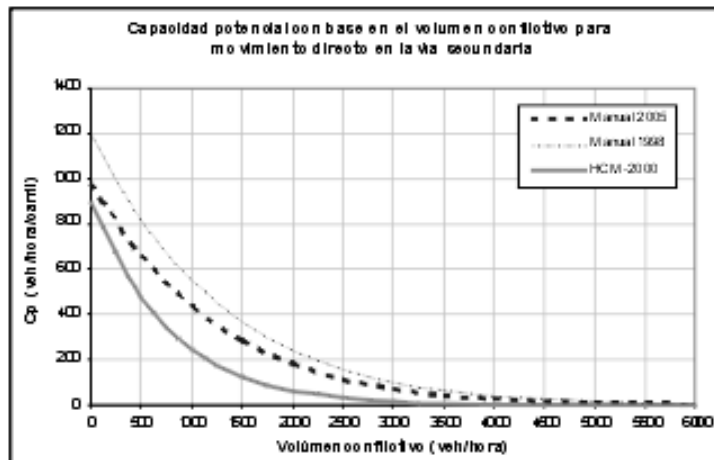
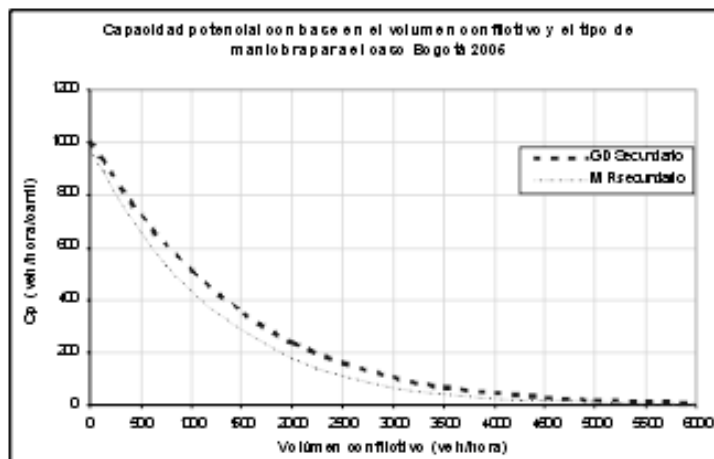


Figura 3.11
Curvas de capacidad en intersecciones de prioridad reguladas con señal de "pare"

Fuente:
elaboración propia



En la Figura 3.12, se muestran tres características principales de glorietas; la isleta, el anillo central y las isletas divisorias. Una glorieta se distingue del resto del tráfico por las siguientes características:

- ◆ Los vehículos que ingresan en una glorieta deben ceder el paso a los que transitan en ese momento por el anillo central. Debido al derecho de paso, algunos vehículos no alcanzan a desviar sus trayectorias correctamente en circuitos pequeños para alcanzar la reducción de velocidad deseada.
- ◆ La circulación vehicular no está sujeta a otro tipo de conflictos debido al dere-

cho de paso y, además, el entrecruzamiento se mantiene mínimo. Esto proporciona los medios por los cuales la prioridad se distribuye alternadamente entre los vehículos. Un vehículo que entra con derecho de paso subordinado, de inmediato se convierte en un vehículo con prioridad hasta que sale de la intersección. En algunos circuitos se imponen medidas de control en la calzada central o se diseñan zonas de entrecruzamiento con el fin de resolver conflictos entre los diferentes movimientos.

- ◆ Algunos círculos pequeños no tienen la capacidad de controlar la velocidad debido al reducido tamaño de la isla central y a que el radio de la trayectoria de los vehículos es grande.
- ◆ No se permite estacionar sobre la calzada central. Las maniobras de parqueo, si estuvieran permitidas, evitarían que la glorieta funcionara correctamente.
- ◆ No se permite ningún tipo de actividad peatonal sobre la isleta central. No se espera que los peatones tengan la necesidad de cruzar la calzada del anillo central.
- ◆ Todos los vehículos deben circular sobre el anillo central en contra de las manecillas del reloj, pasando por la derecha de la isleta central.
- ◆ Las glorietas se diseñan de acuerdo con el tipo de vehículo más crítico que se espera va a utilizarla normalmente. Algunas glorietas pequeñas no pueden albergar gran-

des vehículos debido a los conflictos de paso.

Las glorietas deben tener separadores o isletas deflectoras sobre todos sus accesos. Estas estructuras son esenciales para la seguridad de operación de la glorieta, ya que sirven como separadores del tráfico que se mueve en direcciones opuestas y como refugio para los peatones. En glorietas pequeñas no es necesario disponer de estos separadores.

Según el Manual de capacidad para carreteras (HCM 2000), cuando los cruces peatonales son propuestos dentro de los ramales de acceso, se deben ubicar aproximadamente 5.0 m atrás (la longitud de un vehículo) del punto de entrada a la glorieta. La velocidad del vehículo durante la circulación en una glorieta puede ser controlada por las características propias de la intersección o por señales o marcas en el pavimento.

Estas intersecciones se han venido utilizando cada vez con mayor frecuencia en nuestro medio. Aunque existe una extensa literatura acerca de cómo modelar el tráfico en las glorietas, en Colombia podría decirse que los trabajos de este tipo son muy pocos; por tanto, el desarrollo de una metodología propia escapa al alcance de este libro.

La capacidad de cada entrada a una intersección giratoria está definida como la máxima tasa a la cual los vehículos pueden

esperar razonablemente para entrar en la glorieta desde un ramal de acceso durante un período determinado y en condiciones de tráfico y de geometría de la vía preestablecidos. Un análisis operacional considera un conjunto de condiciones geométricas (de la intersección y sus accesos) y de volúmenes vehiculares. Éstos últimos, requeridos para calcular la capacidad de las glorietas, son los flujos críticos, es decir los volúmenes que se producen en 15 minutos durante la hora pico. También se requiere convertir los movimientos de giro en los flujos de circulación de la glorieta. Mientras que la información de los volúmenes de tráfico promedio anuales diarios (TPDA) es útil para los propósitos de planeamiento, el análisis durante períodos más cortos es indispensable para determinar el nivel de funcionamiento de la glorieta y de sus componentes individuales.

La capacidad de la glorieta en sí no se determina, ya que este dato depende de muchos elementos. El punto importante en este capítulo es el referente a los accesos en las glorie-

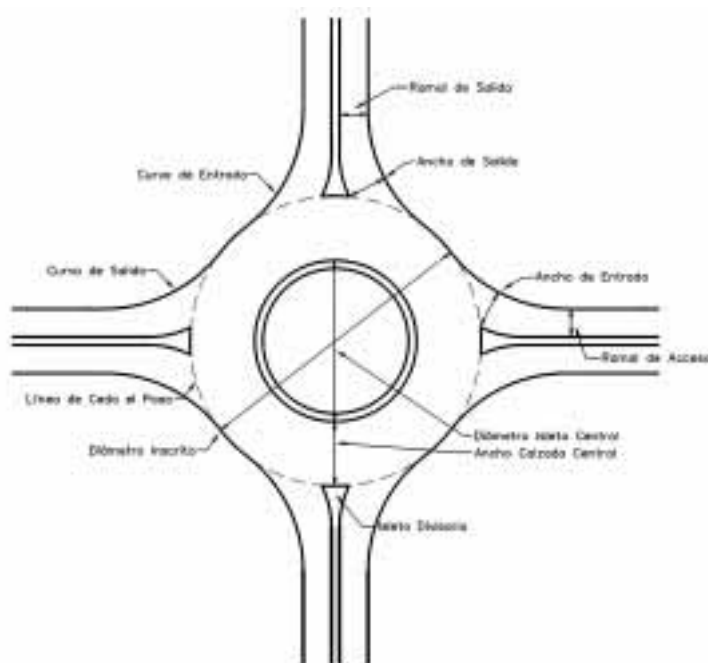


Figura 3.12
Geometría básica en glorietas

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

tas. Este procedimiento es similar a los análisis de métodos operacionales realizados en intersecciones no semaforizadas (reguladas por señales). En cada caso, la capacidad de cada ramal de acceso en su aproximación a la glorieta se estima como función del tráfico opuesto (es decir, por el tráfico que va circulando por el anillo central), de la interacción de estas corrientes de tráfico y de la geometría de la intersección.

Para el diseño correcto de una intersección giratoria, la línea de ceda el paso es el punto relevante para el análisis de la capacidad. La capacidad del ramal de acercamiento es la capacidad proporcionada justo en la línea de ceda el paso, punto donde se sale del ramal y se ingresa en la glorieta. Está determinada por un número de parámetros geométricos que incluyen el ancho de la entrada. En las glorietas cuyo anillo central disponga de más de un carril, es importante balancear el uso de cada uno de estos elementos, debido a que algunos carriles pueden sobrecargarse mientras que otros son subutilizados. Las salidas mal diseñadas pueden influir en el comportamiento del conductor y causar desequilibrio y congestión en el ramal opuesto.

3.3.1 Evolución del concepto de capacidad

A mediados de los años de 1950, en el Reino Unido se utilizaba la llamada fórmula de Wardrop para calcular la capacidad de una glorieta según el método de entrecruzamiento. En 1975 el Departamento de Transporte de Estados Unidos recomendaba, para glorietas convencionales, un nuevo método en que desaparece la proporción del tráfico que se entrecruza y en la que la capacidad de un ramal de acceso depende exclusivamente de los parámetros geométricos. Con la intro-

ducción de la regla de prioridad del anillo, numerosos autores han mostrado el inadecuado funcionamiento de las fórmulas utilizadas anteriormente y se procedió a investigar en otras direcciones.

Por esta razón, en las intersecciones giratorias con prioridad para el anillo central, no se utiliza el concepto global de capacidad de la intersección. Esto se debe a que no existe una correspondencia unívoca entre la geometría y su capacidad, entendida ésta como el número de vehículos que pueden pasar por ella en un tiempo determinado, porque dicha capacidad depende de la distribución del tránsito en las diferentes entradas y de sus direcciones de salida.

En efecto, es fácil entender que una misma glorieta tendrá una capacidad mucho mayor cuando todos los vehículos que entren en ella salgan por la primera salida, es decir, que realicen un simple giro a la derecha, que cuando salgan por la última. Si se presenta el primer caso, nunca existirá algún tipo de conflicto en la calzada central; por tanto, la capacidad de la glorieta será casi igual a la suma de las capacidades de las entradas o salidas; en el segundo caso, la calzada central será paso obligado de los diferentes grupos de vehículos con diferentes orígenes y destinos, lo que disminuirá sustancialmente la capacidad calculada en el caso anterior.

Por estas razones, a menos que se considere como capacidad de una glorieta la que se presenta cuando el 100% de los vehículos entrantes toma la primera salida a la derecha (escenario de máxima capacidad y mínimo conflicto), no parece de gran utilidad hablar de capacidad global de una glorieta.

Como se mencionó, el abandono del concepto de capacidad global de una glorieta se produjo tras descubrir que la calzada central no se comporta como una serie de tramos de

entrecruzamiento, sino como una suma de intersecciones en “T” donde los vehículos entrantes se insertan directamente en el flujo vehicular cuando se presenta la brecha necesaria para ello. A partir de la asimilación de varias intersecciones en “T”, los cálculos de capacidad anteriores basados en el sistema de entrecruzamiento, se reorientaron a partir de las siguientes premisas:

- ◆ No se trataba de estimar la capacidad global de la glorieta, sino que se pretendía calcular la capacidad de cada una de las intersecciones en “T”, en que puede descomponerse.
- ◆ Cada una de estas intersecciones en “T” en que se descompone la glorieta tiene dos magnitudes de tráfico interrelacionadas: el que circula por la calzada central y, el tráfico entrante.
- ◆ Esta relación se supone inversa, ya que resulta evidente que a medida que aumenta el tráfico circulante, la capacidad de entrada de vehículos en cada intersección debe disminuir, si no varían las condiciones geométricas de ésta y se mantiene la prioridad en la calzada central.

Toda esta teoría lleva a sustituir el concepto global de capacidad de una glorieta por el concepto de capacidad de un acceso, y a admitir que ésta no se deriva exclusivamente de su geometría sino, en gran medida, del tráfico circulante por la calzada central.

3.3.2 Requerimientos de información

El método del análisis descrito en este capítulo requiere la especificación de los volúmenes de tráfico para cada ramal de acercamiento a la glorieta, incluido el volumen vehicular para cada movimiento direccional.

Los volúmenes normalmente se expresan en vehículos equivalentes por hora (veh. Equiv./h), por períodos de 15 minutos. Se deben conocer los movimientos en la intersección (en la hora pico) y sus volúmenes. El análisis debe contemplar el factor de hora pico (FHP) para que los volúmenes estén afectados por este parámetro. Si no se dispone de información suficiente para estimar el FHP, se debe utilizar 1.0.

Para cada movimiento direccional existente en por lo menos los períodos pico de la mañana y tarde se debe tomar la información referente a los volúmenes vehiculares presentes en una glorieta, ya que estos movimientos y sus volúmenes en los ramales de entrada y anillo central pueden presentarse en diversas horas durante el día. En general, los aforos en una glorieta se hacen en la línea de parada antes del acceso a la intersección (línea de ceda el paso), con un aforador que cuenta el número de vehículos que pasan por un punto determinado durante un intervalo de tiempo determinado. Sin embargo, en casos particulares donde la demanda exceda la capacidad, es decir, cuando las colas que se presenten no se disipen durante el tiempo que dure el análisis, es importante tener en cuenta que los datos obtenidos en la línea de acceso a la intersección contengan solamente los volúmenes que están siendo atendidos y no el volumen presente en el acceso. En este caso, se debe tener cuidado en recolectar la información corriente arriba desde el final de la cola, de modo que los volúmenes verdaderos de la demanda estén disponibles para el análisis.

Es importante establecer la relación entre los movimientos giratorios tradicionales (origen-destino) en una intersección y los flujos circulantes y entrantes en glorietas, aun si son complicados de estimar, en especial si la inter-

sección tiene más de cuatro accesos. Para las intersecciones convencionales, los datos de la circulación vehicular se acumulan por movimientos direccionales; por ejemplo, el movimiento que viene desde el norte y gira a la izquierda. En las glorietas, los datos de interés para cada ramal de acceso son el flujo de entrada y el flujo circulante por el anillo central. El flujo de entrada es la suma de los movimientos presentes (seguir derecho y giros izquierdos y derechos) en el acceso i . El flujo circulante es la suma de los vehículos procedentes de los diferentes movimientos que entran en la intersección por los otros ramales y pasan frente a la isleta adyacente al ramal i . En las glorietas existentes, estos flujos pueden medirse simplemente en campo. Los giros derechos se deben incluir en los volúmenes vehiculares presentes en las aproximaciones y requieren capacidad, pero no se incluyen en los volúmenes circulantes corriente abajo debido a que ellos salen de la intersección en el ramal siguiente.

En las glorietas de cuatro accesos propuestos, pueden aplicarse las ecuaciones siguientes para determinar conflictos debidos a los flujos vehiculares circulantes, según se muestra en la Figura 3.13.

$$V_{11} = V_8 + V_4 + V_6 + V_{10(3)} + V_{10(2)} + V_{10(4)}$$

$$V_{12} = V_8 + V_5 + V_1 + V_{10(2)} + V_{10(4)} + V_{10(1)}$$

$$V_{13} = V_7 + V_3 + V_5 + V_{10(4)} + V_{10(1)} + V_{10(3)}$$

$$V_{14} = V_7 + V_6 + V_2 + V_{10(1)} + V_{10(3)} + V_{10(2)}$$

Cuando en las glorietas existentes, durante la aproximación, se aforan el tránsito del giro derecho, el circulante por el anillo y el de salida, puedan calcularse otros movimientos direccionales en la intersección, como se muestra en el siguiente ejemplo. La ecuación siguiente muestra el flujo vehicular del movimiento 3 para el ramal occidental en función de los flujos mostrados en la Figura 3.13.

$$V_3 = V_{W \text{ entra}} + V_{E \text{ sale}} - V_{9(3)} - V_{10(1)} + V_{9(2)} + V_{13}$$

Aunque este método es matemáticamente correcto, es algo susceptible de los errores y de las inconsistencias en los datos de entrada. Es importante realizar simultáneamente los aforos en todas las localizaciones en la glorieta. Las inconsistencias en los datos de aforos realizados en diferentes días pueden producir resultados sin sentido, incluidos volúmenes negativos. Como mínimo, se debe comprobar la suma de los volúmenes que entran y que salen, y se deben hacer ajustes en caso de ser necesario para asegurarse de que sea igual la cantidad de vehículos que entran y salen de la intersección.

3.3.2.1 Elementos geométricos

La disposición geométrica de la intersección debe ser consistente con los elementos mostrados en la Figura 3.14.

donde

v = ancho del ramal de entrada [m]

e = ancho de la entrada [m]

r = radio del ramal entrada (borde interno) [m]

θ = ángulo de entrada [grados sexagesimales]

l' = longitud de abocinamiento [m]

D = diámetro del círculo inscrito

3.3.3 El Método del TRL

Se ha seleccionado para describir y aplicar este método empírico inglés considerado el más afinado de los existentes, dada la larga investigación y experiencia inglesa y su mayor tradición en la utilización de este tipo de intersecciones. No obstante, existen otros métodos que se utilizan en el resto del mundo, algunos de los cuales se describirán bre-

vemente más adelante. Este método parte de la hipótesis que la relación entre los dos tráficos (el circulante y el de entrada) es lineal o casi lineal. Su descripción detallada se verá más adelante.

Para aplicar las fórmulas inglesas es preciso disponer de una matriz origen-destino de tráficos y de la definición geométrica de la glorieta. Cabe indicar que existe una variante de este método, la cual se aplicaría únicamente para glorietas a desnivel, es decir, para las situadas debajo o en una vía principal, cuyo trazado está a diferente nivel.

El volumen vehicular máximo que se puede acomodar en un acceso de una glorieta depende de dos factores: el flujo que circula sobre el anillo central, el cual está en conflicto con el flujo de entrada, y los elementos geométricos de la intersección.

Cuando el flujo que circula es bajo, los conductores situados en un ramal pueden entrar en la glorieta sin una demora significativa. Las brechas más largas en la circulación son muy útiles para el acceso de los conductores a la intersección, ya que pueden ingresar a ella uno o más vehículos. A medida que aumenta el volumen sobre el anillo central, la duración de las brechas disminuye y, por consiguiente, también disminuye la tasa de ingresos de vehículos

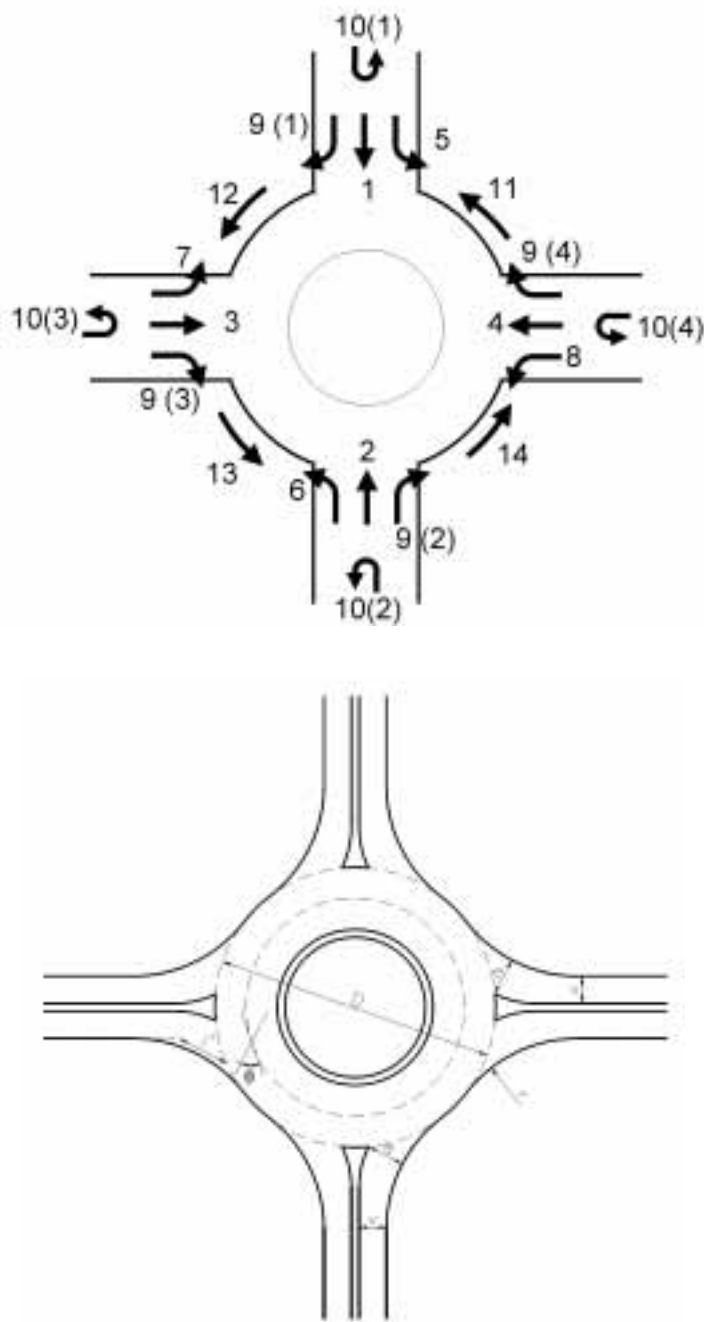


Figura 3.13
Identificación
de
movimientos
vehiculares en
glorieta

Fuente:
elaboración propia

Figura 3.14
Elementos
geométricos en
una glorieta

Fuente:
elaboración propia

con la intersección. Nótese que al estimar la capacidad de un acceso en particular, el volumen vehicular sobre el anillo central puede ser menor que el volumen de demanda, si la capacidad de entrada de un acceso que apor-

ta tránsito al anillo es mayor que la demanda en ese acceso.

Los elementos geométricos de una glorieta también afectan la tasa de flujo vehicular en la entrada. El elemento geométrico más importante es el ancho de la entrada y del anillo central o el número de carriles en la entrada y en el anillo central. Dos carriles en la entrada casi duplican el volumen de vehículos que permitiría un solo carril. Anillos centrales más anchos permiten que los vehículos viajen uno al lado del otro o que sigan en grupos compactos que permitan la creación de brechas más largas entre estos grupos de vehículos. La longitud del abocinamiento también afecta la capacidad de la intersección. El diámetro inscrito de la glorieta (D) y el ángulo de entrada (θ) tienen un efecto menor en el cálculo de la capacidad.

Como en otros tipos de intersecciones de prioridad (reguladas por señales), cuando el volumen vehicular presente en la intersección llega al 85% de su capacidad, las demoras y longitudes de cola varían significativamente de sus valores medios (con desviaciones estándar de magnitudes similares a sus valores medios). Por esta razón, los procedimientos de análisis en países como Australia, Alemania y el Reino Unido, recomiendan que las glorietas se diseñen para que funcionen hasta el 85% de su capacidad estimada.

En la Figura 3.15 se muestra la capacidad esperada de una glorieta en su anillo central, con base en la toma de información de campo para algunas glorietas en Bogotá D.C. Este análisis se basa en la metodología inglesa simplificada, la cual se puede también deducir con un modelo de aceptación de brechas incorporando el comportamiento limitado de prioridad. Se espera que las glorietas cuyos diámetros sean más grandes tengan capaci-

dades levemente mayores en presencia de volúmenes vehiculares medios a altos.

El método inglés parte de una relación entre los tráficos de entrada (Q_e) y circulante (Q_c), el cual supone la relación lineal siguiente:

$$Q_e = k(F - f_c Q_c) \quad f_c Q_c \leq F \quad \text{para} \quad 3.38$$

$$= 0 \quad \text{para} \quad f_c Q_c > F$$

donde

Q_e = capacidad del ramal de entrada
[veh. Equiv./h]

Q_c = volumen vehicular circulante
[veh. Equiv./h]

k , F y f_c son parámetros dependientes de las características geométricas de la glorieta

Para determinar las constantes k , F y f_c , se parte de aforos de tráfico en un número importante de glorietas en condiciones de saturación y de elaboración de rectas de regresión que den la correspondencia entre la geometría y las constantes.

La fórmula inglesa que se describe es considerada “la mejor ecuación predictiva para la capacidad de cualquier glorieta, a excepción de las que poseen calzadas separadas”.

$$k = 1 - 0.00347(\theta - 30) - 0.978\left(\frac{1}{r} - 0.05\right) \quad 3.39$$

$$F = 303x_2 K \quad 3.40$$

$$f_c = 0.21t_D K (1 + 0.2x_2) \quad 3.41$$

$$t_D = 1 + \frac{0.5}{(1 + M)} \quad 3.42$$

$$M = e^{\left(\frac{D-60}{10}\right)} \quad 3.43$$

$$x_2 = v + \frac{e - v}{1 + 2S} \quad 3.44$$

$$S = \frac{1.6(e - v)}{l'} \quad 3.45$$

donde

e = es el ancho de la entrada [m]

v = ancho de la vía de aproximación (ramal) [m]

l' = longitud media efectiva del abocinamiento [m]

S = agudeza del abocinamiento

θ = ángulo de entrada [grados sexagesimales]

D = diámetro del círculo inscrito [m]

r = radio de la entrada [m]

Para comprender mejor estos parámetros, en la Figura 3.16, Figura 3.17 y Figura 3.18 se exponen los parámetros geométricos que se deben tener en cuenta.

3.3.3.1 Efecto de la capacidad en ramales con abocinamientos

En un ramal con abocinamiento, los carriles cortos pueden ponerse en la entrada de la intersección para mejorar su funcionamiento. Si se dispone de un carril corto adicional, se asume que el ancho del anillo central de la glorieta también aumenta. La capacidad del acceso a la glorieta se fundamenta en la suposición que todos los carriles de entrada se usan con eficacia.

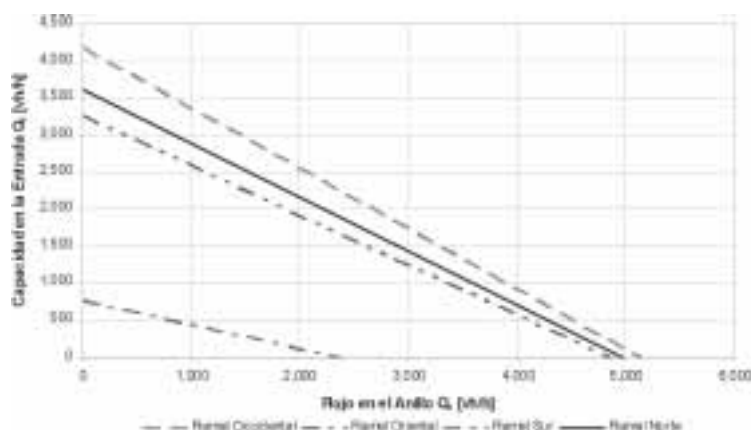


Figura 3.15
Curva de capacidad
Calle 63 con
Carrera 48

Fuente:
elaboración propia

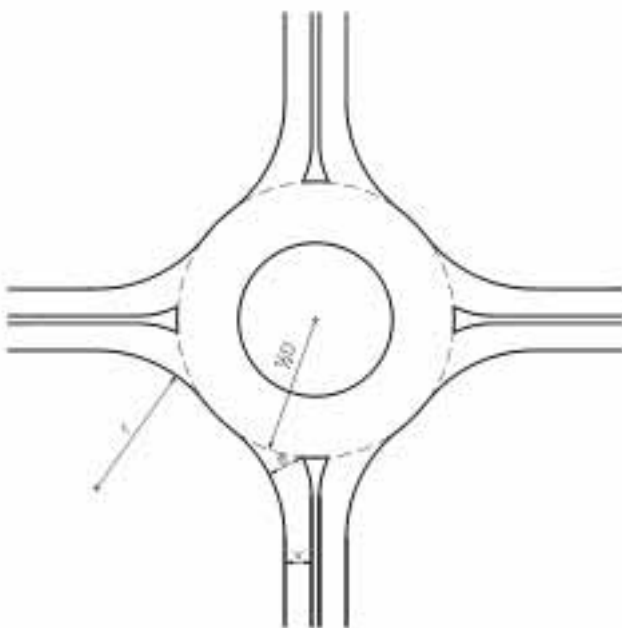


Figura 3.16
Definición de
parámetros
geométricos
(D , R , E Y V)

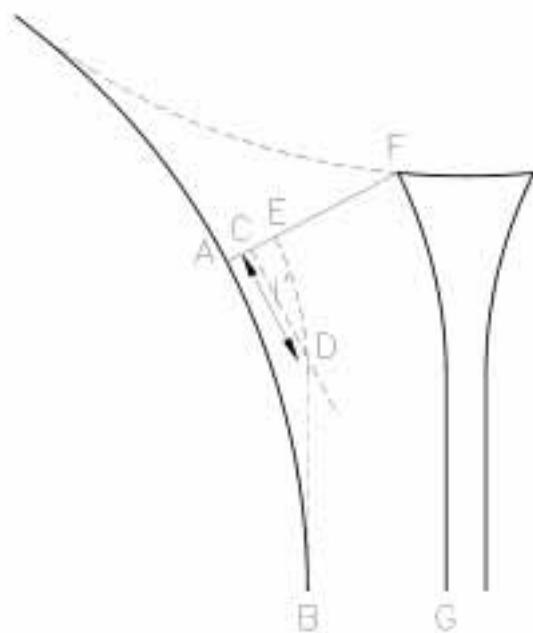
Fuente:
An Enhanced
Program to Model
Capacities, Queues
and Delays at
Roundabouts

3.3.3.2 Efecto de peatones sobre la capacidad

El cruce de peatones por una zona demarcada (cebra, paso peatonal) que dé prioridad sobre el tráfico vehicular, puede tener efecto significativo en la capacidad a la entrada de una glorieta. En algunos casos, si se conocen el volumen peatonal que cruza y el volumen vehicular, la capacidad vehicular

Figura 3.17
Definición de
parámetros
geométricos
(L)

Fuente:
*An Enhanced
Program to Model
Capacities, Queues
and Delays at
Roundabouts*



capacidad de un carril de salida está entre 1,200 y 1,300 veh./h. Sin embargo, los volúmenes de salida que excedan los 1,200 veh./h pueden indicar la necesidad de disponer de un carril de salida adicional.

3.3.4 El Método del CETUR-86

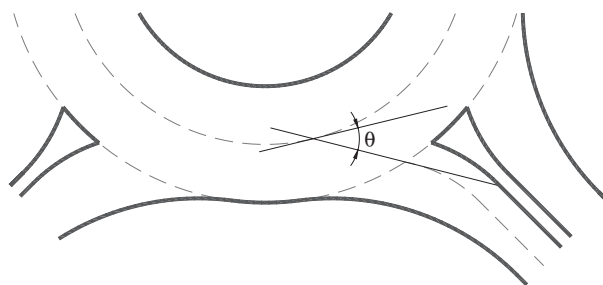
En Francia, donde es amplia la experiencia de funcionamiento de las glorietas, así como la investigación y publicaciones sobre ellas, se utiliza un método para calcular la capacidad de las entradas a las glorietas, de concepción similar al inglés, pero con algunas variaciones.

El cálculo concreto de la capacidad de una entrada se realiza, como en el caso inglés, mediante una fórmula que relaciona el llamado tráfico molesto (Q_c), el cual circula por el anillo central, con la capacidad de la entrada (Q_e).

Las novedades con respecto al método británico radican en que se considera fija la capacidad máxima de una entrada en 1,500 veh./h, es decir, la capacidad de un carril a velocidad reducida, pero sin interferencias y que una parte de los vehículos que abandonan la calzada circular en la anterior salida (aproximadamente un 20%) son considerados como tráfico molesto, en la medida que su decisión de salir y no pasar frente al ramal de acceso no es percibida por el conductor entrante con el tiempo suficiente para decidirse a ingresar en la intersección.

Figura 3.18
Definición de
parámetros
geométricos (θ)

Fuente:
*An Enhanced Program
to Model Capacities,
Queues and Delays at
Roundabouts*



puede ser afectada (multiplicada por el factor M) de acuerdo con la relación mostrada en la Figura 3.19.

Nótese que la impedancia peatonal disminuye cuando aumenta el conflicto con el tránsito vehicular.

3.3.3.3 Capacidad en las salidas

Un flujo de salida de más de 1,400 veh/h en un solo carril dificulta las condiciones de funcionamiento para los vehículos (alineamiento tangencial, la no presencia de peatones y ciclistas). En condiciones normales, la

En definitiva, la fórmula simplificada para el caso de entrada y calzada circular de un solo carril es:

$$Q_e = 1,500 - \frac{5}{6} (Q_c + 0.2Q_s) \quad 3.46$$

donde

Q_e = capacidad de una entrada [veh. Equiv./h]

Q_c = tráfico que circula por el anillo central [veh. Equiv./h]

Q_s = tráfico que sale por el mismo ramal [veh. Equiv./h]

Como puede observarse, la Ecuación 3.46 es de una gran sencillez y en ella no intervienen las características geométricas concretas de glorietas. En la Figura 3.20 se puede ver la curva de capacidad de este método, el cual se aplica para ramales de una sola entrada.

Para el cálculo de capacidades de entradas a glorietas que no cumplan las simplificaciones de la fórmula (un solo carril en la entrada y en el anillo), se propone una serie de correcciones.

En el caso de glorietas urbanas de pequeño diámetro (10 a 30 m), se considera que un ancho mínimo medio de la calzada circular de 8 m no propicia la circulación en doble fila, aunque favorece la entrada forzada de los vehículos que giran a la derecha. Por esta razón, en este caso particular se recomien-

da utilizar un tráfico molesto (Q_c) del 90% del real.

Para las glorietas de diámetro superior, un ancho medio de la calzada circular de 8 m permite la formación de doble fila. En estos casos, debe utilizarse un tráfico molesto (Q_c) del 70% del real.

En cuanto a la influencia del ancho de la entrada, se supone que con un ancho de la calzada circular que permita la doble circulación, una entrada de dos carriles aumenta la capacidad de la misma en casi un 40%. En estos casos, la capacidad obtenida debe afectarse por un factor de 1.4.

En principio, el correcto funcionamiento en entradas de dos carriles y el aumento de la capacidad indicado por el CETUR exigiría anchos de dos carriles en la calzada circular y en las salidas. Un estudio realizado en Madrid (España) parece confirmarlo mediante tomas de video en diferentes glorietas en la

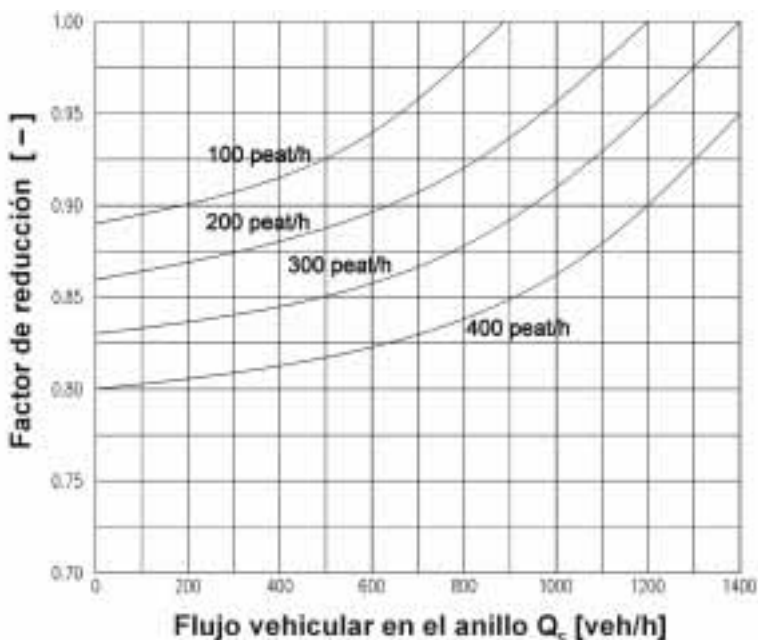
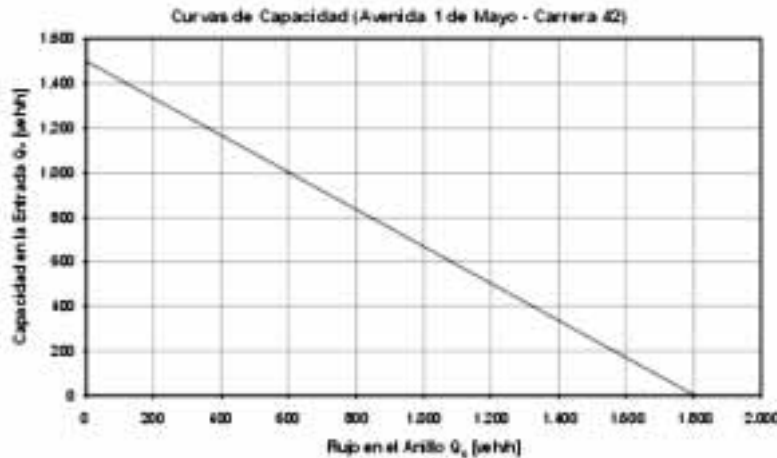


Figura 3.19
Reducción de la capacidad en glorietas de doble carril

Fuente:
Roundabouts An
Informational
Guide.

Nota. Se asume la prioridad para el paso peatonal.

Figura 3.20
Curva de
capacidad -
método del
CETUR



Fuente:
elaboración propia

hora pico, en las que se detectaron comportamientos irregulares (arranques con fuerte aceleración en la línea de ceda el paso) y cierto aumento en la peligrosidad (problemas para acomodarse a las salidas de un solo carril), y en algunas glorietas con dos carriles de entrada y uno de salida en las que predominaba una dirección del tráfico con entrada y salida de la mayoría de los vehículos por los mismos ramales.

La escasa importancia cuantitativa de este tipo de entradas, su significativo índice de peligrosidad, así como los incidentes detectados por la utilización de la calzada circular como tramo de adelantamiento en glorietas con entradas y salidas de un solo carril, pero con calzada circular de dos carriles, parecen mostrar claramente que la construcción de anillos centrales de dos carriles en glorietas con entradas y salidas de un solo carril es prácticamente inoperante a efectos de capacidad y aumenta la peligrosidad de la intersección.

3.3.5 El Método del HCM-2000

Para el análisis de glorietas propuesto por el *Manual de capacidad de carreteras*

(HCM-2000), se define la siguiente terminología:

Q_e = capacidad del ramal de entrada

v_e = volumen del ramal de entrada

Q_c = volumen sobre la calzada circulante

En este numeral, se presenta una metodología basada en la teoría de aceptación de brechas para intersecciones

giratorias no saturadas. Se utilizarán técnicas de aceptación de brechas con los parámetros básicos de brecha crítica y período siguiente a esta brecha.

Para glorietas con un solo carril en su anillo central, se han hecho buenas estimaciones de su capacidad asumiendo que la circulación en la calzada circular es aleatoria. Debido a que las glorietas implican un giro derecho en la intersección, se asume que las características de la aceptación de brechas son iguales a las utilizadas en los giros derechos en las intersecciones de prioridad (Two Way Stop Controlled, TWSP, por sus siglas en inglés).

La estimación de la capacidad en una glorieta de un solo carril está dada por la Ecuación 3.47.

$$Q_e = \frac{Q_c e^{\frac{-Q_c t_c}{3,600}}}{1 - e^{\frac{-Q_c t_f}{3,600}}} \quad 3.47$$

donde

Q_e = capacidad de una entrada [veh. Equiv./h]

Q_c = tráfico que circula por el anillo central [veh. Equiv./h]

t_c = brecha crítica [s]
 t_f = período siguiente [s]

Algunos estudios en Estados Unidos, así como sus comparaciones en otros países con experiencia en diseño y operación de glorietas, indican un rango de valores de estos períodos que deben proveer una estimación razonable de la capacidad aproximada de una glorieta. Los valores recomendados se muestran en la Tabla 3.15.

La relación entre la capacidad del acceso y el flujo circulante entre los límites inferior y superior de estos valores de tiempo se muestra en la Figura 3.21.

La metodología descrita en este numeral se aplica en glorietas cuya calzada circular tenga sólo un carril y hasta 1,200 veh/h.

3.3.6 Análisis de funcionamiento

Para calcular el funcionamiento de una glorieta, existen tres tipos de medidas: grado de saturación, demoras y longitud de colas. Cada uno de estos elementos provee una perspectiva única en la calidad del servicio prestado por la intersección, dados unos elementos geométricos y volúmenes de tránsito iniciales. Siempre que sea posible, el análisis debe estimar estos parámetros para obtener la evaluación más amplia y completa del funcionamiento de una glorieta. En todos los casos, la capacidad estimada de un ramal de acceso debe calcularse antes de obtener una medida del desempeño específico de la glorieta.

Grado de saturación

El grado de saturación (X) es la relación entre la demanda real en

el acceso a una glorieta y su capacidad calculada en ese punto. Esta relación proporciona una idea directa del estado de funcionamiento de la intersección. Aunque no hay estándares absolutos que definan unos límites para el grado de saturación, la metodología australiana sugiere que este valor sea menos de 85% para que la glorieta opere satisfactoriamente. Cuando el grado de saturación excede este valor, la operación en la glorieta puede deteriorarse rápidamente, especialmente en períodos cortos. Las colas pueden aparecer y la demora tiende a aumentar exponencialmente.

	Brecha crítica	Período siguiente
Límite superior	4.1 s	2.6 s
Límite inferior	4.6 s	3.1 s

Tabla 3.15
Brecha crítica y período siguiente

Fuente: *Manual de capacidad para carreteras* (HCM-2000)

Demoras

La demora es un parámetro estándar para medir el funcionamiento en una intersección. El *Manual de capacidad de carreteras*

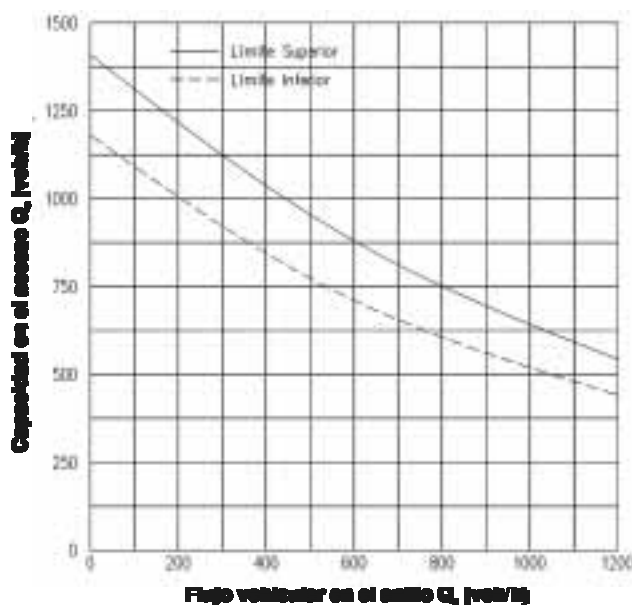


Figura 3.21
Capacidad del ramal (HCM)

Fuente: *Manual de capacidad de carreteras* (HCM-2000)

ras (HCM) identifica las demoras como la medida primaria de eficacia en el análisis de intersecciones semaforizadas y no semaforizadas, determinando su nivel de servicio dado un valor estimado de demora. Actualmente, sin embargo, este Manual sólo incluye demoras de control atribuidas a los dispositivos de control. La demora de control se refiere al tiempo que un conductor gasta en la cola y al tiempo en esperar una brecha aceptable estando frente al flujo vehicular circulante. La fórmula para calcular esta demora está dada en la Ecuación 3.48.

$$d = \frac{3600}{c_{mx}} + 900T^* \left[\frac{v_x}{c_{mx}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{mx}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{mx}} \right) \left(\frac{v_x}{c_{mx}} \right)}{450T}} \right] \quad 3.48$$

donde

d = demora de control promedio [s/veh]

v_x = volumen vehicular para el movimiento x [veh/h]

c_{mx} = capacidad del movimiento x [veh/h]

T = período de análisis [h] ($T = 0.25$ h para 15 minutos)

La Figura 3.22 muestra que la demora de control en un acceso varía con la capacidad de acceso y el flujo circulante. Cada curva de demora termina en una relación volumen/capacidad igual a 1.0, donde la curva proyectada termina y se convierte en una línea punteada.

Nótese que a medida que la demanda se acerca a la capacidad, la demora crece exponencialmente y que con pequeñas variaciones en volumen se producen grandes cambios en

las demoras. Un análisis exacto de las demoras en condiciones cercanas a la saturación requieren la consideración de los siguientes factores:

- ♦ El efecto de colas residuales. Los ramales de acceso a glorietas que operen cerca de su capacidad pueden generar colas residuales significativas, las cuales se deben considerar entre períodos consecutivos. El método presentado anteriormente no tiene en cuenta este fenómeno. Estos factores son tenidos en cuenta en las fórmulas de demora desarrolladas por Kimber y Hollis; sin embargo, son demasiado complejas para desarrollarlas manualmente.
- ♦ El efecto de accesos sobresaturados. Cuando el acceso a una glorieta en el punto de incorporación opera por encima de su capacidad, el volumen vehicular que circula por el ramal es menor que la demanda real. Como resultado de esto, la capacidad de este punto en el ramal de acceso es mayor que la estimada al analizar la demanda actual.

En la mayoría de casos donde la capacidad no exceda el valor de 85%, es suficiente el procedimiento descrito en este capítulo. En casos en que se quiera estimar el funcionamiento de glorietas que operen cerca de su capacidad, se recomienda utilizar software especializado.

Demora geométrica

La demora geométrica es el tiempo adicional que emplea un vehículo, sin interferencias de tráfico, en ir a velocidad restringida (mientras entra en la intersección), recorrer la intersección y volver a tomar la velocidad inicial. La demora geométrica puede ser una consideración importante cuando se realice

un planeamiento en red (posibles efectos sobre las rutas y alternativas de viaje) o al comparar alternativas de varios tipos de intersecciones. Mientras que la demora geométrica es a menudo insignificante para movimientos directos en intersecciones semaforizadas o reguladas por señales, puede ser importante para movimientos que involucren giros como los que se presentan en intersecciones giratorias. El cálculo de la demora geométrica requiere una estimación de la proporción de vehículos que deben parar en la línea de ceda el paso, así como la información geométrica de la glorieta y sus efectos en la velocidad vehicular durante la entrada, el recorrido y la salida de la intersección.

La ecuación utilizada para calcular la demora geométrica es el resultado de una serie de estudios realizados por la universidad de Southampton en varios tipos de intersecciones no semaforizadas. La demora geométrica en un acceso dado de una glorieta está dada por la Ecuación 3.49.

$$d_G = \left(\frac{V_A - JS}{a_{AB}} \right) + \left(\frac{V_D - JS}{a_{CD}} \right) + \frac{d_{BC}}{JS} - \left(\frac{d_1 + d_{AB}}{V_A} \right) - \left(\frac{d_2 + d_{CD}}{V_D} \right) \quad 3.49$$

$$a_{AB} = 1.06 \left(\frac{V_A - JS}{V_A} \right) + 0.23 \quad 3.50$$

$$a_{AB} = 1.11 \left(\frac{V_D - JS}{V_D} \right) + 0.02 \quad 3.51$$

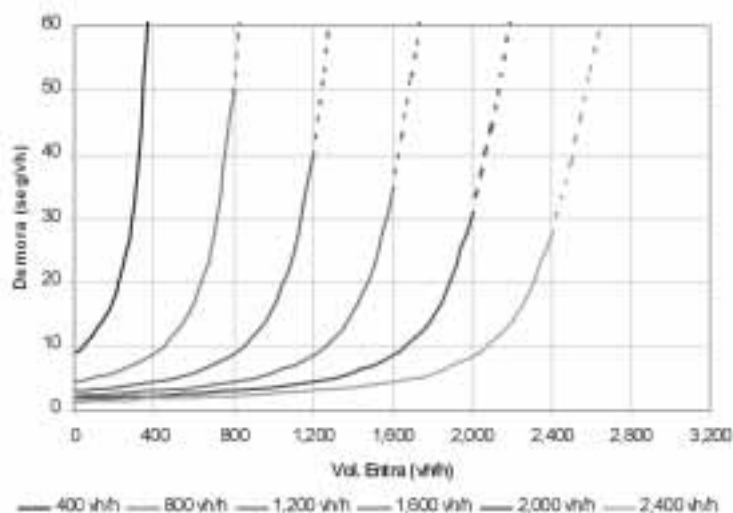


Figura 3.22
Demoras en
función de la
capacidad y el
flujo

Fuente:
Roundabouts An
Informational Guide

$$d_{AB} = \frac{V_A^2 - JS^2}{2a_{AB}} \quad 3.52$$

$$d_{CD} = \frac{V_D^2 - JS^2}{2a_{CD}} \quad 3.53$$

donde

V_A y V_D son las velocidades en el acceso y en la salida respectivamente, medidas en un punto donde la velocidad no esté influenciada por la intersección [m/s].

JS = velocidad en la intersección (anillo) [m/s]

a_{AB} = tasa de desaceleración en el acceso (Figura 3.17) [m/s²]

a_{CD} = tasa de desaceleración en la salida (Figura 3.17) [m/s²]

d_{AB} = distancia donde ocurre la desaceleración cerca de la intersección [m]

d_{CD} = distancia donde ocurre la aceleración fuera de la intersección [m]

d_{BC} = distancia recorrida en la intersección [m]

d_1, d_2 = distancias entre el centro de la intersección y la entrada y salida de la misma [m]

Para el giro izquierdo se tiene,

$$JS = 0.84 (\sqrt{r_e} + \sqrt{r_s}) \quad 3.54$$

Para un movimiento directo donde $0.5(\phi_e + \phi_s) \leq 20^\circ$,

$$JS = 0.47 \left(\frac{V_A + V_D}{2} \right) + 0.035 D_V - 1.18 \quad 3.55$$

donde

f_e = ángulo de entrada [°]

f_s = ángulo de salida [°]

JS = velocidad en la intersección (anillo) [m/s]

DV = distancia de visibilidad [m/s]

Si DV es desconocido,

$$JS = 0.4 \left(\frac{V_A + V_D}{2} \right) + 2.43 \quad 3.56$$

Para un movimiento de giro hacia la derecha o uno directo donde $0.5(\phi_e + \phi_s) > 20^\circ$,

$$JS = 0.96\sqrt{D} + 2.03 \quad 3.57$$

Los parámetros geométricos están definidos en la Figura 3.23 y la Figura 3.24.

Si al realizar los cálculos $JS > V_A$, $JS = V_A$ y $dAB = 0$. De una manera similar, si $JS > V_D$, entonces $JS = V_D$ y $dCD = 0$.

Si $JS > V_A$, entonces $JS > V_D$, $JS = \frac{1}{2}(V_A + V_D)$. Si la demora calculada es menor que cero, entonces la demora es cero.

Colas

La longitud de la cola es importante y se debe tener en cuenta para el diseño de la geometría de los accesos en las glorietas.

El promedio de longitud de la cola (L) puede ser calculada por la regla de Little, como se muestra a continuación:

$$L = \frac{v^* d}{3,600} \quad 3.58$$

donde

v = volumen vehicular entrante [veh/h]

d = demora promedio [s/veh]

La longitud media de las colas es equivalente a vehículos-hora de demora por hora en un acceso. Este dato puede ser útil para comparar el funcionamiento de una glorieta con otros tipos de intersecciones y para analizar métodos de planeamiento que utilizan la demora como un dato de entrada.

Para propósitos de diseño, la Figura 3.25 muestra que el percentil 95 de la longitud de colas varía con el grado de saturación en un acceso. El eje de las abscisas es el grado de saturación, es decir, la relación entre el volumen que entra y la capacidad en un acceso dado. Cada línea del gráfico es producto de la capacidad de entrada y del tiempo T . Para determinar el percentil 95 de la longitud de cola durante el período T , se debe entrar en la gráfica con el valor del grado de saturación.

La siguiente ecuación puede utilizarse para determinar este percentil. Nótese que la Figura 3.25 y la ecuación sólo son válidas cuando la relación volumen/capacidad inmediatamente antes e inmediatamente después del periodo de estudio no es mayor que el 85% (es decir, que las colas residuales son despreciables).

$$Q_{95} \approx 900 T^*$$

$$\left[\frac{v_x}{c_{mx}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{mx}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{mx}} \right) \left(\frac{v_x}{c_{mx}} \right)}{150 T}} \right] \left(\frac{c_{mx}}{3600} \right) \quad 3.59$$

donde

Q_{95} = percentil 95 de la cola [veh]

v_x = volumen vehicular para el movimiento x [veh/h]

c_{mx} = capacidad del movimiento x [veh/h]

T = período de análisis [h] ($T = 0.25$ h para 15 minutos)

3.4 ARTERIAS URBANAS

3.4.1 Características físicas y funcionales

En la jerarquía de las estructuras urbanas de transporte, las arterias urbanas (incluyen vías colectoras) se encuentran entre las vías locales y las vías suburbanas multicarriles y carreteras rurales. La diferencia está determinada principalmente por la función de la vía, las condiciones de control y las características del entorno (usos del suelo).

Las arterias urbanas son corredores que sirven principalmente para atender viajes de grandes distancias. Sin embargo, tienen otra función muy importante: proveer acceso a zonas comerciales y residenciales. Las vías colectoras proveen acceso a diferentes zonas de la ciudad, así como servicio al tránsito en zonas residenciales, comerciales e industriales. Su función en cuanto a accesibilidad es más importante que la de arterias urbanas. A diferencia de éstas, su operación no siempre está determinada por semáforos.

Las vías ubicadas en el centro de la ciudad tienen infraestructuras semaforizadas, las cuales pueden asemejarse a vías arterias. Estas vías no sólo movilizan el tránsito, sino

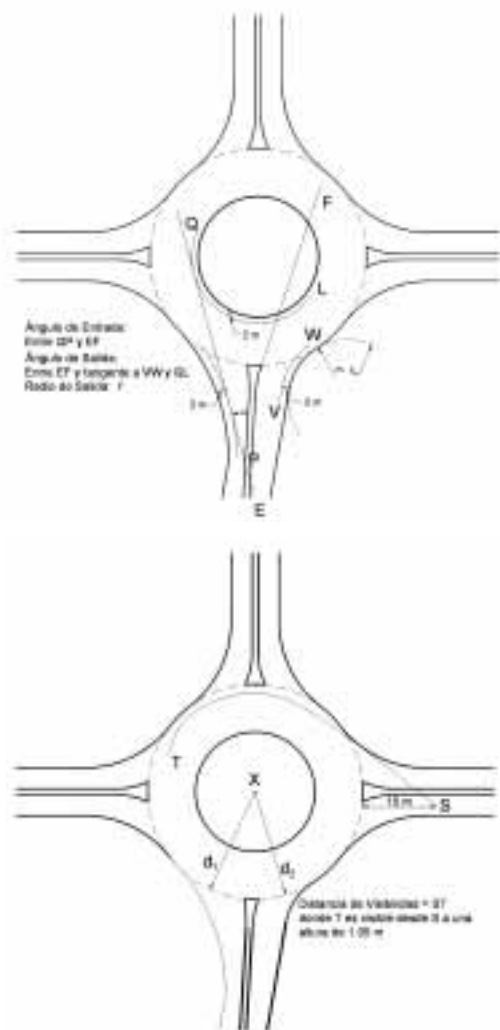


Figura 3.23
Parámetros asociados a la demora geométrica (1)

Fuente: An
Enhanced Program
to Model
Capacities, Queues
and Delays at
Roundabouts

Figura 3.24
Parámetros asociados a la demora geométrica (2)

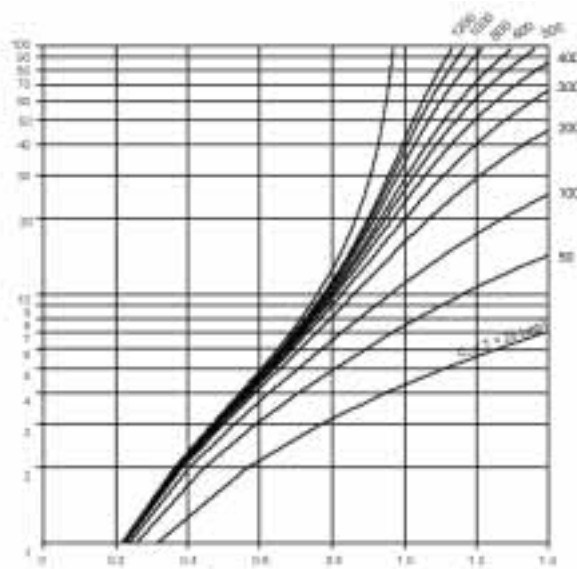
Fuente: An
Enhanced Program
to Model
Capacities, Queues
and Delays at
Roundabouts

que brindan acceso a automóviles, buses y camiones a los sectores locales de negocios. Los movimientos giratorios en intersecciones del centro generalmente son mayores que el 20% del volumen total de tráfico, porque tradicionalmente el tráfico vehicular en el centro se mueve en circuitos.

Los conflictos con peatones y las obstrucciones de carriles ocasionados por el estacionamiento de taxis, buses, camiones y vehículos en maniobras de parqueo pueden ocasionar molestias en el flujo vehicular, y son típicos de zonas céntricas. La función de una vía céntrica puede cambiar según la hora del día, ya que al-

Figura 3.25
Percentil 95 de
la estimación
de colas

Fuente:
Roundabouts An
Informational
Guide.



gunas pueden operar como arterias durante la hora pico.

Las vías suburbanas multicarriles y las carreteras rurales difieren de las arterias urbanas en los siguientes aspectos: el desarrollo en su área de influencia no es muy grande, la densidad en los puntos de acceso no es muy alta y las intersecciones semaforizadas están separadas más de 3.0 km. En estas condiciones, la cantidad de conflictos vehiculares es bastante reducida, el tráfico es más fluido y la disipación de grupos vehiculares ocasionados por semáforos es más rápida.

Los conceptos propuestos en este capítulo pueden utilizarse para determinar la movilidad en una vía urbana. El grado de movilidad proporcionado se estima en función de la velocidad de viaje y del flujo vehicular directo. El funcionamiento de los accesos no está contemplado en estos apartes. El nivel de acceso proporcionado por una vía también puede considerarse dentro de la evaluación de su desempeño, en especial si la vía va a proporcionar tal acceso. Generalmente, los factores que favorecen

la movilidad se reflejan en niveles mínimos en los accesos, y viceversa.

La clasificación funcional de las arterias urbanas se basa en el tipo de servicio que proporcionan al tráfico.

Clasificación

La clasificación urbana sugerida por el *Manual de capacidad de carreteras* (HCM-2000) es ligeramente diferente a la utilizada por la AASHTO.

La clasificación de la AASHTO se basa en el volumen del recorrido, el kilometraje y la vocación de la vía considerada. El método de análisis del *Manual de capacidad de carreteras* utiliza la diferenciación de la AASHTO entre vías arterias principales y secundarias, pero un segundo paso en la clasificación es usado conjuntamente para determinar la categoría de diseño apropiada para la vía arteria. La categoría de diseño depende del límite de velocidad establecido, de la densidad de semáforos, de la densidad de calzadas y puntos de acceso, entre otros factores. El tercer paso es determinar una apropiada clasificación de la vía basándose en una combinación entre la categoría funcional y la de diseño. En la Tabla 3.16 y en la Tabla 3.17 se muestran datos que pueden ser útiles en la clasificación de una vía urbana.

En el *Manual de capacidad de carreteras* se definen cuatro tipos de vías urbanas. La clasificación está designada con numeración romana (vías tipo I, II, III y IV) y refleja una combinación única entre funcionalidad y diseño, como se muestra en la Tabla 3.16. El componente funcional está separado en dos

categorías: arteria principal y arteria secundaria. El componente de diseño está separado en cuatro categorías: vías de alta velocidad, suburbanas, intermedias y urbanas. Las características asociadas a éstas en cada categoría se describen más adelante. En la Tabla 3.16 se presenta un resumen de estas características.

Una arteria principal atiende mayores movimientos directos entre importantes centros de actividades en un área metropolitana, donde una importante porción de viajes ingresan y salen de la zona. En ciudades pequeñas (de poblaciones menores de 50.000 habitantes), su importancia radica en el servicio prestado a través del área urbana.

Una arteria secundaria conecta y complementa el sistema arterial primario. Aunque su función principal es la movilidad, la realiza en un nivel menor y hace énfasis en conectar y dar acceso a diferentes sectores en un grado mayor que las arterias principales. Un sistema de arterias secundarias atiende viajes de duración media y distribuye el flujo en zonas geográficas más pequeñas que no son cubiertas por el sistema principal.

Las vías urbanas son clasificadas más detalladamente en la categoría de diseño. En la Tabla 3.17 se muestran las diferentes clases de vías propuestas, clasificadas por categoría funcional y de diseño.

El concepto de alta velocidad se refiere a una vía urbana con una densidad muy baja de puntos de acceso, carriles separados para los giros izquierdos y estacionamiento prohibido. Puede ser una vía multicarril con calzadas separadas o no, o una vía de dos carriles con bermas. El desarrollo a lo largo de su trazado es bajo y el límite de velocidad está generalmente entre 75 y 90 km/h. En esta categoría se incluyen muchas vías urbanas en escenarios suburbanos.

La categoría suburbana cuenta con una vía de una densidad baja de puntos de acceso, carriles separados para los giros izquierdos y estacionamiento prohibido. Puede ser una vía multicarril con calzadas separadas o no, o una vía de dos carriles con bermas. Los semáforos están separados para permitir un buen movimiento progresivo (hasta tres semáforos por kilómetro). El desarrollo a lo largo de la vía tiene una densidad de baja a media y el límite de velocidad está generalmente entre 65 y 75 km/h.

Categoría de diseño	Categoría funcional	
	Arteria principal	Arteria secundaria
Alta velocidad	I	-
Suburbana	II	II
Intermedia	II	III ó IV
Urbana	III ó IV	IV

Tabla 3.16
Clasificación de vías urbanas (categorías funcionales y de diseño)

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

La categoría de diseño que se refiere a vías urbanas intermedias representa una vía de moderada densidad de puntos de acceso. Puede ser una vía multicarril con calzadas separadas o de una sola calzada de dos carriles en un sentido. Puede tener carriles separados o continuos para los giros izquierdos y algunos tramos donde se permita el estacionamiento. El desarrollo en su entorno es más denso que el de una vía suburbana típica y generalmente tiene de dos a seis semáforos por kilómetro. El límite de velocidad se encuentra generalmente entre 50 y 65 km/h.

La categoría urbana se refiere a una vía con alta densidad de puntos de acceso. En general es una sola calzada de un sentido o de doble sentido con dos o más carriles. Usualmente se permite el estacionamiento, tiene pocos carriles separados para los gi-

ros izquierdos y pueden presentarse algunos conflictos con peatones. Comúnmente tiene de cuatro a ocho semáforos por kilómetro. El desarrollo de su entorno es bastante denso en usos comerciales y su límite de velocidad varía entre 40 y 55 km/h.

Además de las definiciones anteriores, la información de la Tabla 3.17 puede usarse como ayuda para determinar las diferentes categorías de una vía (funcional y de diseño). Una vez se tiene certeza de su categoría, la vía urbana puede clasificarse utilizando la Tabla 3.18. En la práctica, puede presentarse cierta ambigüedad en la elección de las categorías apropiadas. La medida de la velocidad a flujo libre es una gran ayuda para tomar esta decisión, porque cada vía urbana tiene un rango característi-

co de velocidades a flujo libre, como se verá más adelante.

Características del flujo

La velocidad vehicular en este tipo de vías está influenciada por tres factores principales: entorno del sector, interacción de los vehículos y control del tráfico. Estos factores afectan la calidad del servicio.

El entorno del sector incluye las características geométricas de la vía, el uso del suelo y las actividades que se desarrollan a lo largo de su trazado. Así, el entorno define el número y ancho de carriles, tipos de separadores, densidad en su calzada y accesos, separación entre intersecciones controladas con semáforo, existencia de zonas de estacionamiento,

Tabla 3.17
Categorías
funcionales y
de diseño

Criterio	Categoría funcional			
	Arteria principal		Arteria secundaria	
Movilidad	Muy importante		Importante	
Accesibilidad	De menor importancia		Sustancial	
Conectoras	Autopistas, importantes centros de actividad, grandes generadores de tráfico		Arterias principales	
Atención de viajes	Viajes relativamente largos entre grandes centros, viajes directos que entran, salen y atraviesan la ciudad		Viajes de longitud moderada dentro de zonas relativamente pequeñas	
Criterio	Categoría de diseño			
	Alta velocidad	Suburbana	Intermedia	Urbana
Densidad Calzada/Acceso	Muy baja densidad	Baja densidad	Densidad moderada	Alta densidad
Tipo de arteria	Multicarril separada; no separada de dos carriles con berma	Multicarril separada; no separada de dos carriles con berma	Multicarril separada o no; un sentido, dos carriles	Calzadas únicas, uno o dos sentidos, dos o más carriles
Parqueo	No	No	Algunos	Significativos
Carriles separados (Giro Izquierdo)	Sí	Sí	Usualmente	Algunos
Semáforos/km	0.3-1.2	0.6-3.0	2-6	4-8
Límite de velocidad	75-90 km/h	65-75 km/h	50-65 km/h	40-55 km/h
Actividad peatonal	Muy baja	Baja	Alguna	Usualmente
Desarrollo del entorno	Densidad baja	Densidad baja a media	Densidad media a moderada	Alta densidad

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

intensidad de la actividad peatonal y límites de velocidad.

La interacción de vehículos está determinada por la densidad del tráfico, la proporción de buses y camiones y los movimientos de giro. Esta interacción afecta la operación de los vehículos en intersecciones y, en menor grado, entre los semáforos.

El control del tráfico (incluye semáforos y señales) obliga a una porción del tráfico a disminuir la velocidad o a parar. Las demoras y cambios de velocidad causados por los diferentes dispositivos de control del tráfico reducen la velocidad vehicular, sin embargo, son necesarios para establecer las prioridades de paso.

Velocidad a flujo libre

El entorno de una vía urbana afecta la decisión de un conductor para elegir su velocidad de marcha. Cuando la interacción vehicular y los controles de tránsito no son muy determinantes en la vía, la velocidad elegida por el conductor común es conocida como velocidad a flujo libre (Free Flow Speed, FFS, por sus siglas en inglés), es decir, el promedio de velocidad en la corriente de tránsito cuando el volumen vehicular está en un nivel tan bajo que los conductores no están afectados por la presencia de otros vehículos y cuando los dispositivos de control de tránsito (señales o semáforos) no están presentes o están separados a una distancia que no influye en la velocidad de marcha. Por esta razón, la velocidad a flujo libre generalmente se observa entre intersecciones en una arteria urbana.

Velocidad de operación

En raras ocasiones, un conductor puede viajar a velocidad a flujo libre. La mayoría del tiempo, la presencia de otros vehículos

restringe la velocidad debido a diferencias de velocidad entre vehículos o porque algunos vehículos están acelerando aguas arriba, debido a una parada, y no han alcanzado la velocidad a flujo libre de la vía. Como resultado, la velocidad vehicular tiende a ser menor que la velocidad a flujo libre en condiciones de operación con grandes volúmenes.

Una característica de la velocidad, que refleja el efecto de la interacción de los vehículos, es la velocidad media de operación, que se calcula dividiendo la longitud total del segmento estudiado entre el promedio de tiempo empleado en recorrerlo. Este tiempo de operación es el empleado en recorrer el segmento menos cualquier demora producida por paradas.

Velocidad de recorrido

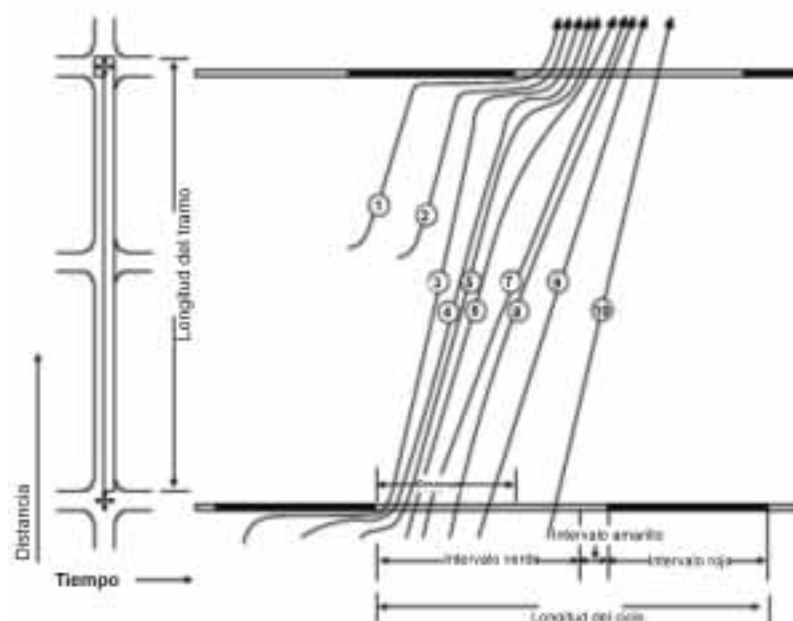
La presencia de dispositivos de control de tráfico en segmentos de vías urbanas tienden a reducir la velocidad vehicular por debajo de la velocidad media de operación. Una característica de la velocidad, que refleja el efecto de los dispositivos de control de tráfico, es la velocidad media de recorrido, que se calcula dividiendo la longitud del segmento de vía entre el promedio de recorrido. Este tiempo de recorrido es el tiempo empleado en recorrer el segmento, incluyendo las demoras producida por paradas.

Trayectoria tiempo-espacio

La Figura 3.26 muestra las trayectorias de tiempo-espacio simplificadas de un vehículo representativo en un carril de una vía urbana. La pendiente de cada línea refleja la velocidad del vehículo en un momento dado. Pendientes más inclinadas significan velocidades más altas; líneas horizontales significan vehículos estacionados.

Figura 3.26
Perfiles típicos
de velocidad
vehicular en
vías urbanas

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)



Según la figura, los vehículos 1 y 2 ingresaron en la vía principal desde accesos laterales, mientras que los demás vehículos fueron liberados desde el semáforo localizado aguas abajo. Los vehículos 1, 2 y 3 llegaron a la próxima intersección durante la fase de rojo y tuvieron que detenerse. El vehículo 4 habría podido llegar a la línea de pare en la fase verde, pero fue detenido por el vehículo 3, que aún no había arrancado.

Los vehículos 5, 6 y 7 no paran, pero deben reducir su velocidad debido a las paradas (de los demás vehículos) ocasionadas por el semáforo. El vehículo 8 va más lento que el vehículo 7. La velocidad de los vehículos 9 y 10 no se vio afectada por la presencia de otros vehículos en el semáforo.

3.4.2 Condiciones básicas para el análisis

En este numeral se trata el tema relacionado con la capacidad y la estimación de los niveles de servicio en arterias urbanas. Esta metodología también puede ser utilizada para

analizar vías suburbanas que tengan un espaciamiento entre semáforos de 3.0 km o menos. Las vías de uno y dos sentidos pueden analizarse también con esta metodología; sin embargo, en el caso de arterias de doble sentido, cada dirección debe tener un análisis aparte.

La metodología propuesta puede emplearse para de-

terminar la movilidad en una arteria urbana. El grado de movilidad calculado se determina en relación con la velocidad de viaje a través de las corrientes del tránsito. La metodología para realizar la clasificación de los accesos de las arterias no es parte de este documento. Sin embargo, el nivel de acceso provisto por una calle debe considerarse dentro en el análisis de la arteria, especialmente si esta calle forma parte de la red vial del corredor. Los factores que favorecen la movilidad a menudo reflejan niveles mínimos en el acceso, y viceversa.

La metodología descrita se centra en la movilidad. Las arterias urbanas con una movilidad aceptable tienden a tener por lo menos 3.0 km de longitud (en zonas céntricas, esta longitud puede reducirse a 1.5 km) y aunque vías cortas también pueden ser analizadas, su función principal tiende generalmente a ser de acceso a un corredor mayor. El acceso puede ser evaluado al tomarse como una intersección individual a lo largo de la vía.

Como se acaba de mencionar, la longitud de una vía urbana que va a ser analizada

debe ser de por lo menos 1.5 km en una zona céntrica y de 3.0 km es en otra área, para que los criterios de velocidad en el nivel de servicio sean de utilidad. Los estudios sobre tramos menores de 1.5 km deben ser analizados como intersecciones individuales y su nivel de servicio se debe determinar por la metodología propuesta para estas instalaciones.

Esta metodología no explica directamente las siguientes condiciones que pueden ocurrir en las intersecciones:

- ◆ Presencia o prohibición de estacionamientos a los costados de la vía
- ◆ Densidad de la vía o control en los accesos
- ◆ Impacto de la pendiente longitudinal entre intersecciones
- ◆ Reducciones de capacidad entre intersecciones (por ejemplo, un puente de menor sección transversal a la de la vía)
- ◆ Separadores a mitad de cuadra y carriles para giros izquierdos en vías de doble sentido
- ◆ Movimientos de giro que excedan el 20% del volumen total presente en la arteria
- ◆ Colas en una intersección que afecten el funcionamiento de la intersección siguiente localizada corriente arriba de la vía
- ◆ Congestión debido a cruces en la vía

Debido a que cualquiera de estas condiciones puede tener un impacto significativo sobre la velocidad, es recomendable modificar algunos apartes de esta metodología para incorporar estos factores.

3.4.3 Metodología

Antes de entrar en los detalles que presenta el *Manual de capacidad de carreteras* (HCM-2000), se debe aclarar que si se dispone de información local referente a tiempos de viaje para una vía dada, se puede hacer una es-

timación del nivel de servicio. La toma de velocidades de viaje directamente sobre un corredor puede proveer un nivel de servicio confiable para esta vía, sin necesidad de utilizar los métodos de cálculo empleados en este documento.

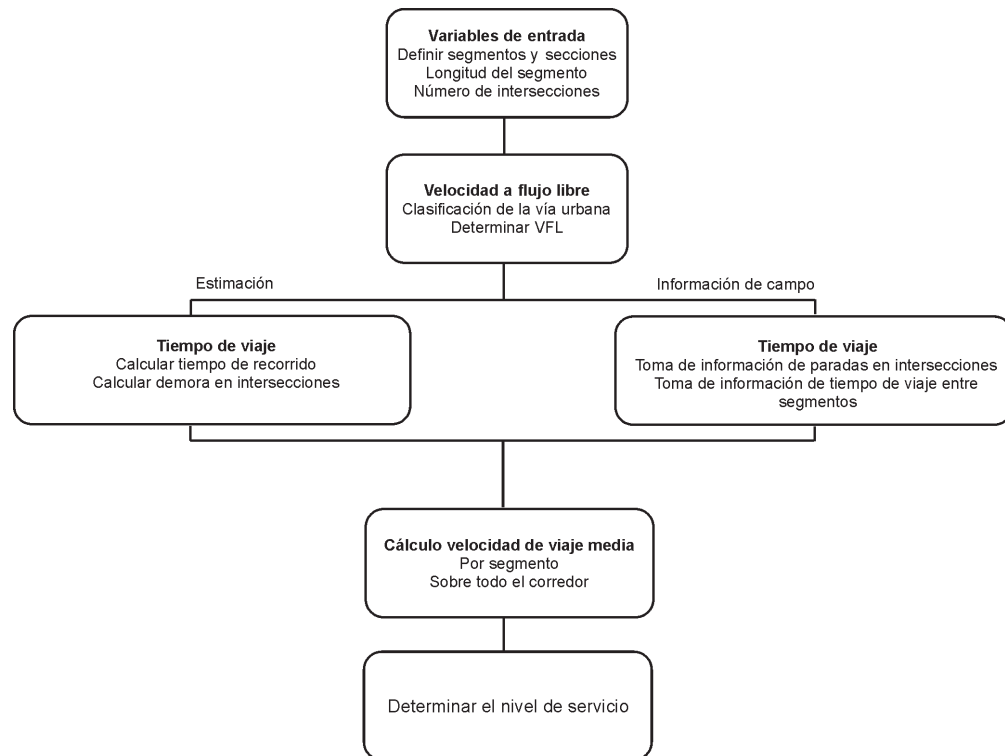
Los modelos de tránsito en arterias urbanas pueden servir de fuentes alternativas para los datos de campo, siempre y cuando los parámetros de entrada sean estimados de acuerdo con los procedimientos descritos en el presente manual y que el cálculo de la demora se basa en las definiciones y ecuaciones aquí presentes o validadas por medio de información de campo. La Figura 3.27 ilustra el método básico para determinar el nivel de servicio en una arteria urbana.

El análisis debe incluir el efecto del espaciamiento entre semáforos, la clasificación de la vía y del flujo de circulación en el nivel de servicio. La metodología utiliza el procedimiento descrito en intersecciones semaforizadas para los grupos de carriles de tráfico directo. Redefiniendo la disposición de los carriles (por ejemplo, la presencia o ausencia de giros izquierdos, número de carriles), del análisis se puede deducir cuál flujo de tráfico está en el grupo de carriles de movimiento directo, así como la capacidad del grupo de carriles. Esta redefinición influye en el nivel de servicio de la calle debido al cambio de la evaluación de cada intersección y, posiblemente, por la clasificación vial.

Nivel de servicio

El nivel de servicio en una arteria urbana se basa en el promedio de la velocidad de viaje de los vehículos que realizan el recorrido en el segmento de vía analizado. La velocidad de viaje es la medida básica para medir el nivel de servicio. El promedio de velocidad de viaje se calcula a partir de los

Figura 3.27
Metodología
para arterias
urbanas



Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

tiempos de recorrido y de las demoras ocasionadas por los dispositivos de control (semáforos). Los siguientes enunciados generales caracterizan el nivel de servicio en vías urbanas.

- ♦ El nivel de servicio A describe principalmente operaciones de flujo libre a velocidades medias de recorrido; en general cerca del 90% de la velocidad a flujo libre dada para cierta clase de vía. Los vehículos son casi libres para realizar maniobras en la corriente de tráfico. La demora de control no es significativa.
- ♦ El nivel de servicio B describe operaciones a velocidad media de recorrido con leves dificultades para realizar maniobras, generalmente cerca del 70% de la velocidad a flujo libre. La demora de control en las intersecciones es mínima.
- ♦ El nivel de servicio C describe operaciones estables; sin embargo, la capacidad

de maniobrar y cambiar de carril en ubicaciones entre intersecciones pueden tener un poco más de restricciones que en el nivel de servicio B. Las largas colas o la descoordinación de semáforos pueden contribuir a una menor velocidad media de recorrido de cerca del 50% de la velocidad a flujo libre.

- ♦ El nivel de servicio D bordea un rango en que pequeños incrementos en el volumen vehicular pueden causar un aumento sustancial en la demora y una disminución de la velocidad de recorrido. El nivel de servicio D puede deberse a la mala coordinación entre semáforos, ciclos semaforicos inapropiados, altos volúmenes de tráfico o una combinación de estos factores. La velocidad media de recorrido es aproximadamente del 40% de la velocidad a flujo libre.
- ♦ El nivel de servicio E está caracterizado por la ocurrencia de demoras importan-

tes y una velocidad media de recorrido de cerca del 33% de la velocidad a flujo libre. Estas operaciones son causadas por una mala coordinación semaforica, alta densidad de intersecciones semaforizadas, altos volúmenes, extensas demoras en intersecciones críticas y ciclos semaforicos inapropiados.

- ◆ El nivel de servicio F está caracterizado por flujo vehicular que opera a velocidades muy bajas, en general de un tercio a un cuarto de la velocidad a flujo libre. La congestión probablemente se debe a una intersección semaforizada crítica, con grandes demoras, altos volúmenes y largas colas.

La demora de control es la porción de la demora total que experimenta un vehículo que se aproxima y posteriormente ingresa a una intersección semaforizada, la cual es atribuible a la operación del semáforo. La demora de control incluye las demoras debidas a la desaceleración inicial, el movimiento de avance en la cola, paradas y aceleraciones.

El nivel de servicio en este tipo de vías está influenciado por el número de semáfo-

ros por kilómetro y por la demora de control en cada una de las intersecciones. Una sincronización inadecuada del semáforo, una mala progresión y un incremento en el volumen de tránsito pueden afectar significativamente el nivel de servicio. Las vías cuya densidad de semáforos va de media a alta (por ejemplo, más de uno por kilómetro) son más susceptibles a estos factores. Se puede observar un bajo nivel de servicio, incluso antes que ocurran estos problemas. Los segmentos de arterias urbanas más largos que comprendan intersecciones con altos volúmenes de tránsito pueden proveer un nivel de servicio aceptable, aunque una intersección esté operando a un nivel más bajo. El término de movimientos directos hace referencia al movimiento de los vehículos que circulan por el segmento de estudio sin realizar giros, ni salirse del corredor.

En la Tabla 3.18 se muestran los criterios de nivel de servicio basados en la velocidad de viaje. Nótese que si el volumen de demanda excede la capacidad en cualquier punto del tramo de estudio, la velocidad promedio de viaje puede llegar a ser una medida no recomendable para estimar el nivel de servicio.

Tipo de vía	I	II	III	IV
Rango de velocidad *	90-70 km/h	70-55 km/h	55-50 km/h	55-40 km/h
Velocidad típica	80 km/h	65 km/h	55 km/h	45 km/h
NS	Velocidad promedio de viaje (km/h)			
A	> 72	> 59	> 50	> 41
B	> 56 - 72	> 46 - 59	> 39 - 50	> 31 - 41
C	> 40 - 56	> 33 - 46	> 28 - 39	> 23 - 32
D	> 32 - 40	> 26 - 33	> 22 - 28	> 18 - 23
E	> 26 - 32	> 21 - 26	> 17 - 22	> 14 - 18
F	≤ 26	≤ 21	≤ 17	≤ 14

Nota. * Velocidad a flujo libre.

Tabla 3.18
Nivel de servicio para arterias urbanas según su clasificación

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

Datos de entrada y valores estimados

La estimación de la velocidad, la demora y el nivel de servicio de una vía arteria urbana o de una intersección requiere información de la configuración geométrica de la estructura y de la demanda. Los datos de control semafórico no se encuentran dentro del alcance de este numeral. La Tabla 3.19 muestra valores estándar de parámetros de entrada en caso de que no se disponga de información local.

Tabla 3.19
Información de
entrada para
vías urbanas

Fuente:
*Manual de
capacidad de
carreteras*
(HCM-2000)

Elemento	Valor
Información de la geometría	
Clase de vía	Tabla 3.17 y Tabla 3.20
Longitud	-
Velocidad a flujo libre	
Información de control en la intersección	
Densidad de semáforos	
Demora en la intersección	Ver intersecciones semaforizadas

Se debe tener en cuenta que la información de campo usada como datos de entrada es la más recomendable.

Velocidad a flujo libre

La velocidad a flujo libre se usa para determinar el tipo de vía urbana y para estimar el tiempo de recorrido sobre el tramo. Si la velocidad a flujo libre no puede ser medida en campo, se deben realizar tomas de información en corredores similares dentro de la misma zona o, de existir, recurrir a las políticas locales. Si no hay manera de utilizar cualquiera de estas opciones, se debe recurrir al límite de velocidad establecido (o a un valor cercano) o a valores estándar definidos por el *Manual de capacidad de carreteras*.

La velocidad a flujo libre en una vía urbana es la velocidad de viaje de un vehículo en condiciones de bajo tráfico y con los semáforos del corredor en su fase verde en todo el recorrido. De esta manera, cualquier demora que se presente en las intersecciones semaforizadas, incluso en condiciones de bajo flujo vehicular, debe excluirse en el momento de calcular la velocidad a flujo libre en la vía. La mejor ubicación para medir este parámetro son los centros de las cuerdas y lo más lejos posible de cualquier intersección (ya sea semaforizada o de prioridad). Esta toma de información debe realizarse en condiciones de bajo tráfico, es decir con menos de 200 veh/h/carril. En la Tabla 3.21 se muestran los valores sugeridos por el *Manual de capacidad en carreteras* en caso de ausencia de información local.

Densidad de semáforos

La densidad de semáforos se refiere al número de intersecciones semaforizadas existentes en el tramo de estudio dividido entre la longitud de éste. Si las intersecciones semaforizadas se utilizan para definir los puntos de inicio y fin del tramo en estudio, para estimar la densidad de semáforos sólo se debe tener en cuenta una. En la Tabla 3.21 se muestran los valores sugeridos por el *Manual de capacidad en carreteras* en caso de ausencia de información local.

Factor de hora pico

Si no se dispone de valores locales para el factor de hora pico (FHP), se pueden usar algunas aproximaciones. Para condiciones de congestión, 0.92 se considera un valor razonable. Para condiciones en que se presenta un flujo uniforme durante la hora pico, pero

no es posible reconocer el pico máximo, se puede utilizar un valor de 0.88.

Duración del período de análisis

El procedimiento analítico utilizado para medir la velocidad en una vía urbana depende de la estimación de las demoras en las intersecciones del corredor. Las ecuaciones de demora para intersecciones semaforizadas y de prioridad son más precisas cuando la demanda es menor que la capacidad en el período seleccionado. Si la demanda excede la capacidad, las ecuaciones pueden estimar la demora en los vehículos que llegan durante el período del análisis, pero no determinan el efecto del exceso de demanda (la cola residual para el próximo periodo) en los vehículos que llegan durante el período siguiente.

El periodo típico de análisis es 15 minutos. Sin embargo, si la demanda crea una cola residual en este período (es decir, una relación v/c mayor de 1.0), se deben considerar períodos adicionales de 15 minutos o un solo análisis más largo en que se pueda mejorar la estimación de la demora.

Si se trabaja con un análisis de varios periodos, se debe tener cuidado de llevar la cola residual de un período a otro. La velocidad, la demora y el nivel de servicio pueden ser estimados para cada período de análisis. Una manera de presentar los resultados puede ser el promedio de nivel de servicio de todos los períodos de análisis realizados; sin embargo, este método puede llegar a desdibujar algunos resultados puntuales.

Si se trabaja en un período largo (por ejemplo una hora), se debe tener mucho cuidado en el desarrollo del análisis y en la interpretación de resultados. El factor de hora pico (FHP) puede modificarse para proporcionar una tasa de flujo adecuada en el período

de análisis más largo. Se debe tener en cuenta que los criterios para obtener el nivel de servicio en vías urbanas, intersecciones semaforizadas y de prioridad fueron desarrollados para períodos de 15 minutos. Las condiciones que persisten durante largos períodos (probablemente con peores condiciones en su pico en estos periodos) pueden no encontrarse en el criterio de nivel de servicio de los 15 minutos.

Tipo de vía	Velocidad
I	85 km/h
II	65 km/h
III	55 km/h
IV	45 km/h

Tipo de vía	Semáforos
I	0.5 sem/km
II	2.0 sem/km
III	4.0 sem/km
IV	6.0 sem/km

Tabla 3.20

Velocidad a flujo libre según el tipo de vía

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

Tabla 3.21

Densidad de semáforos según el tipo de vía

Fuente: Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

Determinación del tiempo de recorrido

Existen dos componentes principales del tiempo total que un vehículo emplea en recorrer un segmento de vía dado: el tiempo de marcha y la demora de control en las intersecciones semaforizadas. Para calcular el tiempo de marcha, es necesario conocer el tipo de vía, la longitud del segmento y la velocidad a flujo libre. El tiempo de marcha puede hallarse utilizando los valores de la Tabla 3.22.

En cada tipo de vía existen varios factores que influyen en el tiempo de marcha. En la Tabla 3.22 se muestra el efecto de la longitud del segmento. Además, la presencia de estacionamientos, la fricción lateral, el desarrollo local

Tabla 3.22
Tiempo de
marcha por
kilómetro

Tipo de vía	I			II			III			IV	
VFL (km/h)	90 ^a	80 ^a	70 ^a	70 ^a	65 ^a	55 ^a	55 ^a	50 ^a	55 ^a	50 ^a	40 ^a
Longitud promedio	Tiempo de marcha por kilómetro (s/km)										
100 m	b	b	b	b	b	b	-	-	-	129	159
200 m	b	b	b	b	b	b	88	91	97	99	125
400 m	59	63	67	66	68	75	75	78	77	81	96
600 m	52	55	61	60	61	67	d	d	d	d	d
800 m	45	49	57	56	58	65	d	d	d	d	d
1.000 m	44	48	56	55	57	65	d	d	d	d	d
1.200 m	43	47	54	54	57	65	d	d	d	d	d
1.400 m	41	46	53	53	56	65	d	d	d	d	d
1.600 m	40 ^c	45 ^c	51 ^c	51 ^c	55 ^c	65 ^c	d	d	d	d	d

- a Es mejor tener una estimación de la velocidad a flujo libre (VFL). Si no se dispone de la información necesaria, se recomiendan utilizar los siguientes valores:

Tipo de vía	VFL (km/h)
I	80
II	65
III	55
IV	45

- b Si el Tipo I o II tienen una longitud menor de 400 m, se debe reevaluar la clasificación, y si sigue siendo un segmento distinto, utilizar los valores para 400 m.
- c Para segmentos largos (mayores de 1.600 m) en vías tipo I y II, la velocidad a flujo libre puede usarse para calcular el tiempo de recorrido por kilómetro. Estos tiempos se observan en los accesos para segmentos de 1.600 m.
- d De esta manera, las arterias urbanas de tipo III o IV con segmentos mayores de 400 m, primero deben ser reevaluadas. De ser necesario, pueden extrapolarse los valores por encima de 400 m.

Fuente:
Manual de
capacidad de
carreteras
(HCM-2000)

y la vocación de la vía pueden afectar el tiempo de marcha. La observación directa de la velocidad a flujo libre incluye el efecto de estos factores, los cuales implícitamente influyen en la velocidad de marcha.

Si no es posible hacer tomas de velocidad a flujo libre en la vía en estudio o en corredores similares, los valores por defecto se muestran en la Tabla 3.22.

Aunque en esta tabla no se observa, el tiempo de recorrido en un segmento depende del volumen vehicular; sin embargo, la dependencia de la demora en la intersección es mayor y domina en el cálculo de la velocidad de recorrido.

Determinación de la demora

El cálculo de la velocidad en una arteria urbana requiere hallar las demoras de control en las intersecciones. Debido a que la función de una vía de este tipo es servir al tráfico que utiliza todo el corredor, el grupo de carriles de movimiento directo se usa para caracterizar la arteria.

La demora de control para movimientos directos es el valor que se debe utilizar en la evaluación de una arteria urbana. En general, esta información debe estar disponible ya que el análisis total debe incluir el análisis separado de cada intersección semaforizada.

La Ecuación 3.60 se utiliza para calcular la demora de control. La Ecuación 3.61 y la Ecuación 3.62 se utilizan para calcular la demora uniforme y la incremental, respectivamente.

$$d = d_1 PF + d_2 + d_3 \quad 3.60$$

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{g}{C}\right]} \quad 3.61$$

$$d_2 = 900T \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kLX}{cT}} \right] \quad 3.62$$

donde

- d = demora de control [s/veh]
- d_1 = demora uniforme [s/veh]
- d_2 = demora incremental [s/veh]
- d_3 = demora inicial por cola [s/veh]
- PF = factor de ajuste por progresión (Tabla 3.24)
- X = relación volumen capacidad para el grupo de carriles (v/c)
- C = longitud del ciclo [s]
- c = capacidad del grupo de carriles [veh/h]
- g = tiempo efectivo de verde [s]
- T = duración del período de análisis [h]
- k = ajuste de la demora incremental debido al control actuado
- l = ajuste de la demora incremental debido al semáforo corriente arriba

Demora uniforme

La Ecuación 3.61 da un valor estimado de la demora de control, suponiendo una distribución uniforme de las llegadas y de un flujo vehicular estable. Esta ecuación está basada en el primer término de la formulación de

Webster para demoras y se acepta como la representación exacta de la demora en un caso ideal en que todos los arribos se distribuyen uniformemente. Los valores de X mayores de 1.0 no se usan para calcular este valor (d_1).

Demora incremental

La Ecuación 3.62 estima la demora incremental debido a las llegadas no uniformes y a las fallas individuales del ciclo (es decir, demora aleatoria), así como demoras causadas por períodos sostenidos de sobresaturación (se refiere a demoras por sobresaturación). La ecuación relaciona el grado de saturación (X) de cada grupo de carriles, la duración del análisis (T), la capacidad del grupo de carriles (c) y el control del semáforo (k). En la ecuación se supone que la totalidad de la demanda ha sido atendida en el anterior período de análisis, lo que significa que no hay colas. La demora incremental es válida para todos los grados de saturación.

Demora inicial por cola

Cuando una cola procedente del período anterior está presente en el inicio del análisis, los vehículos que llegan a la intersección experimentarán una demora inicial debido a la cola existente. Esta demora resulta del tiempo adicional requerido para evacuar la cola inicial. Su magnitud depende del tamaño inicial de la cola, de la duración del período de análisis y de la relación v/c en ese período dado.

Tipo de llegada y tamaño de pelotón

Una característica crítica que puede ser cuantificada para el análisis de una arteria

urbana o intersección semaforizada es la calidad de la progresión. El parámetro que describe estas características se llama tipo de llegada o arribo (TA) para cada grupo de carriles. Este parámetro aproxima la calidad de la progresión definiendo seis tipos de flujo dominante en la llegada.

El arribo tipo 1 se caracteriza por un denso pelotón de más del 80% del volumen del grupo de carril que llega en el inicio de la fase roja. Este tipo de arribo representa los enlaces de la red que experimentan una pobre tasa de progresión debido a diferentes factores, incluida la falta de coordinación.

El arribo tipo 2 se caracteriza por una densidad moderada del pelotón que llega en la mitad de la fase roja o en un pelotón disperso; entre 40 y 80% del volumen del grupo de carriles llegan durante la fase roja. Este tipo de arribo representa una progresión desfavorable en la arteria.

El arribo tipo 3 consta de una serie de llegadas aleatorias en que el pelotón principal contiene menos del 40% del volumen. Este tipo de arribo representa operaciones no interconectadas en intersecciones semaforizadas con una alta dispersión de pelotones. También puede representar una operación coordinada con las mínimas ventajas de la progresión.

El arribo tipo 4 se caracteriza por un pelotón con una densidad moderada, por llegadas en la mitad de la fase verde o por un pelotón disperso; entre 40 y 80% del volumen del grupo de carriles llegan durante la fase verde. Este tipo de arribo representa una progresión favorable en la arteria.

El arribo tipo 5 se caracteriza por un pelotón moderadamente denso; cerca del 80% del volumen llega al inicio de la fase verde. Este tipo de arribo representa una alta favorabilidad de la progresión, la cual puede pre-

sentarse en trayectos que tengan un bajo o moderado número de accesos laterales y que además reciban una alta prioridad en el semáforo.

El arribo tipo 6 ocurre en casos excepcionales en que la calidad de la progresión está cerca de las condiciones ideales. Este arribo representa pelotones densos, los cuales circulan en intersecciones espaciadas con pocas interferencias o no significativas de los accesos laterales.

El tipo de arribo o llegada se observa mucho mejor directamente en campo, pero se puede tener una aproximación examinando los diagramas de tiempo-espacio de la vía. El tipo de arribo debe determinarse con la mayor exactitud posible ya que tiene un impacto significativo en la estimación de la demora y en el nivel de servicio. Aunque no haya parámetros definitivos para cuantificar el tipo de arribo, la relación definida por la Ecuación 3.63 es útil.

$$R_p = P \left(\frac{C}{g} \right) \quad 3.63$$

donde

- R_p = tamaño del pelotón
- P = proporción de vehículos que llegan en la fase verde
- C = duración del ciclo [s]
- g = tiempo de verde efectivo [s]

El valor de P puede ser estimado u observado directamente en campo, siempre y cuando C y g sean tomados de la fase semafórica presente. El valor de P no debe ser mayor de 1.0. El rango aproximado de valores para R_p , relacionado con el tipo de arribo, se muestra en la Tabla 3.23, en la que también se pueden observar los valores por defecto utilizados en los cálculos siguientes.

Factor de ajuste por progresión

Una buena progresión en el semáforo se debe a la llegada a la intersección de una alta proporción de vehículos en la fase verde; por el contrario, una mala progresión significa que muy pocos vehículos llegan en verde. El factor de ajuste por progresión, PF , se aplica a todos los grupos de carril coordinados, si el semáforo es de tiempos fijos o es un sistema semiactuado. La progresión afecta principalmente la demora uniforme; por tanto, este factor sólo se aplica a d_i . El valor de PF se puede determinar mediante la Ecuación 3.64.

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{\left(1 - \frac{g}{C}\right)} \quad 3.64$$

donde

PF = factor de ajuste por progresión

P = proporción de vehículos que llegan en la fase verde

f_{PA} = factor suplementario para la llegada de pelotones durante la fase verde

C = duración del ciclo [s]

g = tiempo de verde efectivo [s]

El valor de P puede ser medido directamente en el campo o examinando los diagramas de tiempo-espacio de la vía. El valor de PF también puede ser calculado a partir de

valores de P , medidos utilizando los valores por defecto de f_{PA} . De manera alternativa, los valores de la Tabla 3.24 pueden emplearse para determinar PF en función del tipo de arribo basado en los valores por defecto de P y f_{PA} . Si PF se calcula utilizando la Ecuación 3.64, este valor no debe ser mayor de 1.0 para el arribo tipo 4 con valores extremadamente bajos de g/C . Como una cuestión práctica, se debe asignar como máximo un valor de 1.0 a PF para un arribo tipo 4.

El factor de ajuste por progresión, PF , requiere conocimientos en velocidades de viaje y en intersecciones semaforizadas. Cuando la demora se estima para una coordinación futura, en especial cuando se analizan alternativas, el arribo tipo 4 se debe asumir como condición base para grupos coordinados de carriles (exceptuando giros izquierdos) y el arribo tipo 3 debe ser asumido para todos los grupos de carriles sin coordinación.

Para movimientos realizados desde carriles exclusivos para giros izquierdos desde fases exclusivas, el factor de ajuste por progresión generalmente debe ser 1.0 (es decir, el tipo de arribo 3). Sin embargo, si la coordinación del semáforo prevé una progresión para los giros izquierdos, el factor de ajuste debe ser calculado según el tipo de arribo, así como de sus movimientos directos. Cuando la coordinación del giro izquierdo forme parte de una fase protegida y permitida, sólo el tiempo de verde de la fase protegida puede

Arribo	Rango de valores para R_p	Valor por defecto de R_p	Calidad de la progresión
1	= 0.50	0.333	Muy mala
2	> 0.50 - 0.85	0.667	Desfavorable
3	> 0.85 - 1.15	1.000	Llegadas aleatorias
4	> 1.15 - 1.50	1.333	Favorable
5	> 1.50 - 2.00	1.667	Altamente favorable
6	> 2.00	2.000	Excelente

Tabla 3.23
Relación entre tipo de arribo y tamaño del pelotón (RP)

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

utilizarse para determinar este factor, ya que esta fase se asocia normalmente a la coordinación de pelotones. Un flujo importante promedio para P puede usarse en la determinación de FP cuando se emplea un diagrama de tiempo-espacio y los movimientos del grupo de carriles tienen diferentes niveles de coordinación.

Ajustes de demora incremental debido a controles actuados

En la Ecuación 3.62, el término k incorpora el efecto del control de la demora. Para semáforos de tiempo fijo, se utiliza un valor de $k = 0.5$. Esto se basa en la existencia de una cola con llegadas aleatorias y en un servicio uniforme equivalente a la capacidad del grupo de carriles. Los semáforos actuados, sin embargo, pueden tener un tiempo de verde diseñado a la medida de la demanda existente, reduciendo el tiempo total de demora incremental. La reducción de la demora depende, en parte, de la brecha mínima del dispositivo de control entre vehículos durante el despeje y del grado de saturación. El *Manual de capacidad de carreteras* (HCM-2000) indica que más bajas duraciones de la fase (por ejemplo, una operación intermitente de la in-

tersección) dan lugar a menores valores de k y d_2 . Cuando el grado de saturación se acerca a 1.0, funcionará un control actuado como si fuera uno de tiempos fijos, produciendo valores de k cercanos a 0.50 en grados de saturación iguales o mayores de 1.0. En la Tabla 3.25 se muestran los valores de k recomendados para semáforos actuados con diferentes grados de saturación y diferentes tiempos de brecha mínima.

Para valores de brecha mínima que no se encuentren en la Tabla 3.25, se puede interpolar para obtener los valores de k . Si se usa la ecuación mostrada en esta tabla, el valor mínimo de k se debe interpolar primero con la brecha mínima y posteriormente se utiliza la ecuación. Los valores de la Tabla 3.25 se pueden extrapolar para obtener valores de brecha mínima mayores de 5.0 segundos, pero el valor extrapolado de k nunca debe ser mayor de 0.50.

Factor de ajuste debido al semáforo corriente arriba (l)

El término l en la Ecuación 3.62 es el factor de ajuste por las llegadas filtradas debido a semáforos ubicados corriente arriba. Un valor de l igual a 1.0 se utiliza para una inter-

Tabla 3.24
Factor de ajuste por progresión para una demora uniforme

Fuente:
Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000)

Relación de verde (g/C)	Tipo de arribo					
	TA 1	TA 2	TA 3	TA 4	TA 5	TA 6
0,20	1,167	1,007	1,000	1,000	0,833	0,750
0,30	1,286	1,063	1,000	0,986	0,714	0,571
0,40	1,445	1,136	1,000	0,895	0,555	0,333
0,50	1,667	1,240	1,000	0,767	0,333	0,000
0,60	2,001	1,395	1,000	0,576	0,000	0,000
0,70	2,556	1,653	1,000	0,256	0,000	0,000
f_{PA}	1,00	0,93	1,00	1,15	1,00	1,00
R_p	0,333	0,667	1,000	1,333	1,667	2,000

Brecha Mínima (s)	Grado de saturación (X)					
	≤ 0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	≤ 1,00
≤ 2,0	0,04	0,13	0,22	0,32	0,41	0,50
2,5	0,08	0,16	0,25	0,33	0,42	0,50
3,0	0,11	0,19	0,27	0,34	0,42	0,50
3,5	0,13	0,20	0,28	0,35	0,43	0,50
4,0	0,15	0,22	0,29	0,36	0,43	0,50
4,5	0,19	0,25	0,31	0,38	0,44	0,50
5,0*	0,23	0,28	0,34	0,39	0,45	0,50
Tiempos fijos o movimientos no actuados	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Para una brecha mínima y su mínimo valor de k para $X=0,50$: $k=(1-2k_{min})(X-0,5)+k_{min}$ donde $k=k_{min}$, $k=0,5$
 Para una brecha mínima mayor de 0,50 s, se debe extrapolar para encontrar k , manteniendo $k=0,5$,

Tabla 3.25
Valores de K
para el tipo de
control

Fuente:
Manual de
Capacidad de
Carreteras
(HCM-2000)

sección aislada¹. Este valor se basa en un número aleatorio de vehículos que llegan cada ciclo; por tanto, la variancia es igual a la media en estas llegadas.

Un valor de l menor de 1.0 es usado para intersecciones no aisladas. Esto refleja la manera en que los semáforos corriente arriba del flujo vehicular disminuyen la variación en el número de arribos por ciclo en dicha intersección. Como resultado, disminuye la demora debido a llegadas aleatorias.

Esta tabla se basa en X_u y en la relación v/c de todos los movimientos corriente arriba que contribuyen al volumen en dicha intersección. Para el análisis del desempeño de una arteria urbana, es suficiente aproximar X_u a la relación v/c del movimiento directo de corriente arriba.

Determinación de la velocidad de viaje

La Ecuación 3.65 se utiliza en cada segmento y en la sección entera para calcular la velocidad de viaje.

$$S_A = \frac{3.600L}{T_R + d} \quad 3.65$$

donde

S_A = velocidad promedio de viaje en el segmento dado [km/h]

L = longitud del segmento [km]

T_R = total del tiempo de marcha [s]

d = demora de control para movimientos directos en la intersección [s]

En casos especiales, se pueden presentar demoras en mitad de cuadra causadas por paradas de vehículos y cruces peatonales, u otro tipo de demoras debido a paradas de buses, entre otros. Estas demoras adicionales se pueden agregar al denominador de la Ecuación 3.60.

Determinar el nivel de servicio

En cada tipo de arteria se aplican criterios diferentes para estimar el nivel de servicio, los cuales se basan en las diferentes expectativas de los conductores para las diferentes clases de vías. Tanto la velocidad a flujo libre y las definiciones de nivel de servicio en intersecciones forman parte de la evalua-

1. Una intersección se considera aislada cuando está separada más de 1.6 km de la intersección corriente arriba más cercana.

Tabla 3.26

Valores de I para grupos de carriles con semáforos corriente arriba

Fuente:

Manual de capacidad de carreteras (HCM-2000)

	Grado de saturación corriente arriba (X_u)						
	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	≤ 1.00
I	0.922	0.858	0.769	0.650	0.500	0.314	0.090

Nota. $I=1.0-0.91X_u^{2.68}$ y $X_u=1.0$.

ción. En la Tabla 3.18 se muestran los criterios de nivel de servicio para cada clase de arteria urbana. Estos criterios varían según el tipo de vía: en la de menores especificaciones (arteria tipo 4), las menores expectativas de los conductores y la menor velocidad de operación están asociadas al nivel de servicio. Esto significa que una vía tipo 3 da un nivel de servicio B a una menor velocidad que una vía tipo 1.

Sólo es posible dar el concepto de nivel de servicio general para un corredor de una arteria urbana, si todos los segmentos de esta vía están en la misma clasificación.

Sensibilidad de resultados

Las siguientes curvas de flujo-velocidad muestran la sensibilidad de la velocidad de viaje con respecto a:

- ♦ Velocidad a flujo libre
- ♦ Relación v/c
- ♦ Densidad de semáforos
- ♦ Clase de arteria urbana

La intersección crítica es la intersección con la relación v/c más alta (en los movimientos directos). La capacidad de los movimientos directos de una intersección se calcula con la Ecuación 3.66.

$$c = N * s * \frac{g}{C} \quad 3.66$$

donde

c = capacidad del carril directo [veh/h]

N = número de carriles directos en la intersección

s = ajuste del flujo de saturación por carril [veh/h]

C = duración del ciclo [s]

g = tiempo de verde efectivo [s]

La capacidad de una vía de este tipo se define, para una sola dirección del recorrido, como la capacidad del movimiento directo en su punto más bajo (generalmente en la intersección semaforizada). La capacidad está determinada por el número de carriles, el flujo de saturación por carril (influenciado por las características geométricas y los factores de demanda) y el tiempo de verde por ciclo para el movimiento directo.

La duración del ciclo también puede afectar la capacidad de la vía. Un ciclo más largo generalmente permite una mayor proporción del tiempo de verde disponible para los movimientos directos, pero aún existen tiempos de despeje para los peatones, los intervalos de cambio de fase y los tiempos vehiculares de despeje.

La coordinación del semáforo mejora las velocidades y el nivel de servicio de la vía. Sin embargo, una mejora en la coordinación no necesariamente aumenta la capacidad de la vía por sí misma, pues se debe mejorar la relación g/C para vías principales con un plan de coordinación.

Al incrementar la densidad de semáforos, bajan las velocidades y el nivel de servicio, pero no se afecta la capacidad, a menos que se adicionen semáforos con relaciones

menores de g/C o menores tasas de flujos de saturación para los movimientos directos.

Aplicaciones

Para utilizar la metodología descrita anteriormente, se deben formular dos preguntas fundamentales.

En primer lugar, es necesario ver cuál sería la salida primaria. Esta, incluye el nivel de servicio y el volumen de flujo factible (v_p). Las medidas de desempeño relacionadas con la demora de control y velocidad de viaje también son salidas, pero se consideran secundarias.

En segundo lugar, se deben identificar los valores por defecto o estimados para utilizarlos en el análisis. Básicamente existen tres fuentes para esta información:

- ◆ Valores por defecto descritos en este documento.
- ◆ Valores por defecto derivados de información local.
- ◆ Valores basados en información de campo.

Una aplicación común de la metodología es calcular el nivel de servicio de una vía arteria existente o que se planea modificar a corto o largo plazos. Este tipo de aplicaciones se conocen como operacionales y su resultado principal es el nivel de servicio, además de la velocidad y la demora.

Otro tipo de aplicación da soluciones para el servicio del volumen de flujo vehicular (v_p), como la salida principal, con el fin de tener una herramienta de decisión para implementar mejoras. En este análisis, como dato de entrada, se debe indicar un nivel de servicio deseado y un número de carriles. Esto se usa para estimar el máximo volumen vehicular que puede ser atendido por la vía

proyectada con el nivel de servicio inicial dado.

En otro nivel de aplicación, el planeamiento, se utilizan estimaciones y valores por defecto (ya sea del manual o de datos locales). Como resultado, se puede determinar un nivel de servicio o un volumen vehicular en el corredor analizado, con demoras y velocidades como datos de salida secundarios. La diferencia entre el análisis de planeamiento y el operacional está en que, en el primero, la mayoría o la totalidad de variables de entrada son estimaciones o valores por defecto, mientras que, en el segundo, las variables son producto de un análisis de información de campo o valores locales conocidos. Para cada análisis, la velocidad a flujo libre (ya sea medida o estimada) se requiere como una variable de entrada.

Segmentos de una arteria urbana

Al inicio del análisis, se deben definir la ubicación y longitud de la vía y se debe identificar toda la información relevante referente a características físicas, semáforos y tránsito. Es necesario considerar la dimensión de la vía, que en zonas céntricas puede tener al menos 1.5 km de longitud y 3.0 km en otras áreas, así como sus segmentos.

El segmento o tramo es la unidad básica del análisis, el cual está definido como la distancia en una sola dirección que va desde una intersección semaforizada hasta la siguiente. La Tabla 3.17 muestra el concepto de segmentos en una vía de uno o doble sentido.

Planeamiento

El objetivo de un análisis de nivel de servicio en esta etapa es estimar las condiciones de operación de la vía. Su exactitud depende de las variables de entrada. Este análisis es el

Figura 3.28
Tipos de
segmentos en
una arteria
urbana



Fuente:
*Manual de
capacidad de
carreteras*
(HCM-2000)

más recomendado cuando sólo se deseen estimaciones de nivel de servicio, la información de campo no está disponible y el año horizonte del proyecto está lejos.

Una diferencia importante entre el análisis de planeamiento de intersecciones semaforizadas y de arterias urbanas es el trato que se da a los giros vehiculares. En una arteria urbana se hace énfasis en los movimientos directos y se supone que los giros izquierdos en intersecciones importantes se realizan desde carriles exclusivos con fases exclusivas. Como resultado de este supuesto, se pueden simplificar muchas variables de entrada y muchos análisis complejos en la intersección utilizando valores por defecto.

Los planeamientos para nivel de servicio y para volumen (v_p) corresponden directamente a los procedimientos descritos para

análisis de operaciones (nivel de servicio) y de diseño (v_p), respectivamente.

El criterio principal para saber qué tipo de planeamiento de debe utilizar es el uso de estimaciones, de valores por defecto del manual o de valores basados en información local. El tráfico promedio anual (TPA) es otro factor que define la aplicación de un análisis de planeamiento para estimar el volumen de la hora de diseño.

Para propósitos de planeamiento, la velocidad a flujo libre debe estimarse con base en estudios de campo o en estudios sobre vías de similares características, y debe ser consistente con las clasificaciones de vías dadas en el presente documento. Según el *Manual de capacidad de carreteras* (HCM-2000), el límite de velocidad máximo permitido puede utilizarse como un sustituto de este valor; sin embargo, en nuestro medio, este límite no sería un valor que refleje la realidad de la operación.

Una vez tomado el tiempo de recorrido en cada uno de los tramos, con las posibles demoras, y de acuerdo con la longitud de cada uno, se calculó la velocidad de movimiento a flujo libre. En la Tabla 3.27, a manera de ejemplo, se presentan los resultados de un recorrido realizado por la Carrera 7.

No.	Tramo	Longitud [km]	Tiempo de recorrido [s]	Tiempo de demora [s]	Tiempo en movimiento [s]	Velocidad de recorrido [km/h]	Velocidad de movimiento a flujo libre [km/h]
1	Av. 32 a calle 45	1,56	107,05	21,47	85,58	52,53	65,71
2	Calle 45 a calle 53	0,93	67,60	13,73	53,87	49,31	61,88
3	Calle 53 a calle 60	0,68	41,93	1,00	15,93	58,47	59,90
4	Calle 60 a calle 72	1,24	63,86	13,23	50,63	69,90	88,17
5	Calle 72 a calle 94	2,70	168,77	10,17	158,60	57,59	61,29
	Total arteria	7,11	449,21	84,60	364,61	56,97	70,19

Tabla 3.27
Resultados
velocidad a
flujo libre
corredor
Carrera 7ª

Fuente:
elaboración propia

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manual de capacidad de carreteras 2000 (HCM-2000), Transportation Research Board, 2000.
Recomendaciones para el diseño de glorietas en carreteras suburbanas, Dirección General de Carreteras, Madrid, 1995.

Roundabouts An Informational Guide, Federal Highway Administration, Junio de 2000.
An Enhanced Program to Model Capacities, Queues and Delays at roundabouts, Transport Research Laboratory (TRL), 1985.
Transit Capacity and Quality of Service Manual, Transportation Research Board, 1999.

4

Programas de ingeniería de Tránsito

CONTENIDO

4.1	SOFTWARE PARA PLANEACIÓN Y EVALUACIÓN (HCS 2000)	4-9
4.1.1	Descripción	4-9
4.1.2	Alcances	4-10
4.1.2.1	Análisis operacional	4-10
4.1.2.2	Análisis de diseño	4-10
4.1.2.3	Análisis de planeación	4-10
4.1.3	Estructura del HCS	4-10
4.1.4	Operación del HCS	4-10
4.1.4.1	Datos y ruta de datos del HCS	4-11
4.1.4.2	Archivos de datos del HCS	4-11
4.1.4.3	Menús específicos del HCS	4-12
4.1.5	Módulo de análisis de segmentos básicos de autopista	4-13
4.1.5.1	Descripción de las secciones	4-13
4.1.6	Módulo de análisis de vías multicarriles	4-16
4.1.6.1	Descripción de las secciones de análisis de vías multicarriles	4-17
4.1.7	Módulo de análisis de vías de dos carriles	4-19
4.1.7.1	Descripción de las secciones de análisis de vías de dos carriles bidireccionales	4-20
4.1.7.2	Descripción del módulo de análisis de vías de dos carriles Análisis unidireccional	4-23
4.1.8	Módulo de análisis de rampas de convergencia y divergencia	4-27
4.1.8.1	Descripción de las secciones de análisis de rampas de convergencia y divergencia	4-27
4.1.9	Módulo de análisis de tramos de entrecruzamiento	4-30
4.1.9.1	Descripción de las secciones de análisis de tramos de entrecruzamiento	4-30
4.1.10	Módulo de análisis de intersecciones semaforizadas	4-33
4.1.10.1	Descripción de las secciones de análisis de intersecciones semaforizadas	4-33
4.1.11	Módulo de análisis de intersecciones no semaforizadas	4-37
4.1.11.1	Descripción de las secciones de análisis de intersecciones no semaforizadas	4-38
4.1.12	Módulo de análisis de arterias urbanas	4-43
4.1.12.1	Descripción de las secciones de análisis de arterias urbanas	4-44
4.2	SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN Y LA OPTIMIZACIÓN	4-46
4.2.1	Signalised & Unsignalised Intersection Design and Research Aid (SIDRA)	4-46
4.2.1.1	Descripción	4-46
4.2.1.2	Alcances	4-47
4.2.1.3	Beneficios y utilidades	4-47
4.2.1.4	Componentes del SIDRA	4-47
4.2.1.5	Operación del Programa SIDRA	4-48
4.2.1.6	Operación del Programa RIDES	4-51
4.2.2	Traffic Network Study Tool (TRANSYT-7F)	4-51

4.2.2.1	Descripción	4-51
4.2.2.2	Alcances	4-54
4.2.2.3	Beneficios y utilidades	4-56
4.2.2.4	Componentes del TRANSYT-7F	4-56
4.2.2.5	Operación del Programa TRANSYT-7F	4-57
4.2.2.6	Operación del MAP	4-58
4.2.3	Traffic Signal Coordination Software (SYNCHRO)	4-61
4.2.3.1	Alcances	4-65
4.2.3.2	Beneficios y utilidades	4-65
4.2.3.3	Componentes del SYNCHRO	4-66
4.2.3.4	Operación del Programa SYNCHRO	4-66
4.2.3.5	Operación del Programa SIMTRAFFIC	4-69
4.3	SOFTWARE PARA LA MICROSIMULACIÓN	4-70
4.3.1	(LISA+)	4-71
4.3.1.1	Alcances	4-71
4.3.1.2	Beneficios y utilidades	4-73
4.3.1.3	Componentes del LISA+	4-74
4.3.1.4	Operación del Programa LISA+	4-75
4.3.2	Traffic Software Integrated System (TSIS)	4-81
4.3.2.1	Alcances	4-82
4.3.2.2	Beneficios y utilidades	4-83
4.3.2.3	Componentes del TSIS	4-84
4.3.2.4	Operación del programa TSIS	4-85
4.3.3	Verkehr in Städten - Simulation (VISSIM)	4-93
4.3.3.1	Alcances	4-93
4.3.3.2	Beneficios y utilidades	4-94
4.3.3.3	Componentes del VISSIM	4-95
4.3.3.4	Operación del Programa VISSIM	4-95
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4-102

FIGURAS

Figura 4.1	Estructura principal del HCS	4-11
Figura 4.2	Menú principal del programa HCS 2000	4-12
Figura 4.3	Módulos de análisis del programa HCS 2000	4-12
Figura 4.4	Configuración general típica	4-13
Figura 4.5	Buscando módulo de análisis de segmentos básicos de autopista HCS 2000	4-15
Figura 4.6	Módulo de análisis de segmentos básicos de autopista HCS 2000	4-16
Figura 4.7	Ajuste de volúmenes	4-16
Figura 4.8	Datos de planeamiento	4-17
Figura 4.9	Ajuste de velocidades	4-17
Figura 4.10	Resultados	4-17
Figura 4.11	Buscando módulo de análisis de vías multicarriles	4-18
Figura 4.12	Módulo de análisis	4-18

Figura 4.13	Ajuste de velocidades	4-19
Figura 4.14	Ajuste de volúmenes	4-20
Figura 4.15	Resultados	4-20
Figura 4.16	Buscando módulo de análisis de vías de dos carriles bidireccionales	4-20
Figura 4.17	Módulo de análisis de vías bidireccionales	4-21
Figura 4.18	Entrada de datos en vías bidireccionales	4-22
Figura 4.19	Velocidad media de viaje en vías bidireccionales	4-22
Figura 4.20	Porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento en vías bidireccionales	4-23
Figura 4.21	Resultados del análisis en vías bidireccionales	4-23
Figura 4.22	Buscando módulo de análisis en vías unidireccionales	4-24
Figura 4.23	Módulo de análisis de vías de dos carriles unidireccionales	4-24
Figura 4.24	Entrada de datos de vías unidireccionales	4-25
Figura 4.25	Velocidad media de viaje en vías unidireccionales	4-25
Figura 4.26	Porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento en vías unidireccionales	4-26
Figura 4.27	Resultados del análisis de vías unidireccionales	4-26
Figura 4.28	Análisis de carril de adelantamiento en vías unidireccionales	4-27
Figura 4.29	Buscando módulo de análisis de rampas de convergencia y divergencia	4-28
Figura 4.30	Módulo de análisis de rampas de convergencia y divergencia	4-28
Figura 4.31	Entrada de datos del módulo de análisis de rampas de convergencia y divergencia	4-29
Figura 4.32	Ajuste de volúmenes en rampas de convergencia y divergencia	4-30
Figura 4.33	Resultados del módulo de rampas de convergencia y divergencia	4-31
Figura 4.34	Buscando módulo de análisis de tramos de entrecruzamiento	4-31
Figura 4.35	Módulo de análisis de tramos de entrecruzamiento	4-32
Figura 4.36	Entrada de datos del módulo de tramos de entrecruzamiento	4-32
Figura 4.37	Ajuste de volúmenes en tramos de entrecruzamiento	4-33
Figura 4.38	Resultados del módulo de tramos de entrecruzamiento	4-33
Figura 4.39	Módulo de análisis de intersecciones semaforizadas	4-34
Figura 4.41	Datos geométricos y de volúmenes de análisis de intersecciones semaforizadas	4-35
Figura 4.40	Módulo de análisis de intersecciones semaforizadas	4-35
Figura 4.42	Parámetros de operación de análisis de intersecciones semaforizadas	4-36
Figura 4.43	Diseño de fases de análisis de intersecciones semaforizadas	4-37
Figura 4.44	Ajuste de flujo de saturación de intersecciones semaforizadas	4-38
Figura 4.45	Resultados del análisis de intersecciones semaforizadas	4-39
Figura 4.46	Buscando módulo de análisis de intersecciones no semaforizadas	4-39
Figura 4.47	Módulo de análisis de intersecciones no semaforizadas	4-40
Figura 4.48	Entrada de datos geométricos, volúmenes y ajustes de análisis	4-41
Figura 4.49	Ajuste de brechas críticas y tiempos de seguimiento	4-42
Figura 4.50	Entrada de volúmenes peatonales del análisis de intersecciones no semaforizadas	4-42
Figura 4.51	Datos de intersecciones semaforizadas corrientes	4-43
Figura 4.52	Resultados del análisis de intersecciones no semaforizadas	4-43
Figura 4.53	Buscando módulo de entrada de arterias urbanas	4-44
Figura 4.54	Módulo de análisis de arterias urbanas	4-45
Figura 4.55	Información de características del tránsito de análisis de arterias urbanas	4-45
Figura 4.56	Ajuste de características de la arteria urbana	4-46
Figura 4.57	Características de dispositivos de control de arterias urbanas	4-46
Figura 4.58	Resultados del análisis de arterias urbanas	4-46

Figura 4.59	Menú principal del Programa SIDRA	4-48
Figura 4.60	Configuración inicial del módulo de análisis de intersecciones	4-49
Figura 4.61	Barra de herramientas principal	4-51
Figura 4.62	Entrada de datos finalizada en el Programa SIDRA	4-51
Figura 4.63	Salida de datos del análisis realizado	4-52
Figura 4.64	Configuración inicial del módulo rides	4-52
Figura 4.65	Menú principal del TRANSYT-7F	4-57
Figura 4.66	Módulo de análisis del TRANSYT-7F	4-58
Figura 4.67	Datos de entrada del TRANSYT-7F	4-58
Figura 4.68	Barras de herramientas del manejador principal del TRANSYT-7F	4-60
Figura 4.69	Menú principal de entrada de datos gráficos del TRANSYT-7F	4-61
Figura 4.70	Menús específicos de entrada de datos del TRANSYT-7F	4-62
Figura 4.71	Menú de análisis del programa TRANSYT-7F	4-63
Figura 4.72	Menú principal del editor de tipos de registros del TRANSYT-7F	4-63
Figura 4.73	Barra de herramientas del editor de tipos de registros del TRANSYT-7F	4-65
Figura 4.74	Menú principal del programa	4-66
Figura 4.75	Barras de herramientas	4-67
Figura 4.76	Información de entrada de geometría por carril en intersecciones	4-70
Figura 4.77	Información de entrada de volúmenes en intersecciones	4-71
Figura 4.78	Información de entrada de tiempos en intersecciones	4-71
Figura 4.79	Información de entrada de fases en intersecciones	4-72
Figura 4.80	Diagrama espacio-tiempo en intersecciones	4-72
Figura 4.81	Menú principal del Programa SIMTRAFFIC	4-73
Figura 4.82	Menú principal del Programa LISA+	4-75
Figura 4.83	Menú principal del administrador de proyectos del Programa LISA+	4-77
Figura 4.84	Menú de distancias/ alimentación básica en LISA+	4-79
Figura 4.85	Menú de datos del nodo LISA+	4-80
Figura 4.86	Barra de herramienta LISA+	4-82
Figura 4.87	Menú principal del TSHELL	4-85
Figura 4.88	Menú principal del programa TRAFED	4-87
Figura 4.89	Barras de herramientas del TRAFED	4-88
Figura 4.90	Menú principal del CORSIM	4-91
Figura 4.91	Menú principal del TRAFVU	4-92
Figura 4.92	Menú principal del VISSIM	4-96
Figura 4.93	Barras de herramientas del Programa VISSIM	4-99
Figura 4.94	Menú principal de los archivos de salida del VISSIM	4-100
Figura 4.95	Menú principal del paquete TEAPAC Programa PRESYNCHRO	4-100
Figura 4.96	Menú principal del paquete TEAPAC WinTEAPAC	4-102

TABLAS

Tabla 4.1	Extensiones de archivos de análisis en el HCS 2000	4-13
Tabla 4.2	Barra de menús y submenús de los módulos específicos del HCS 2000	4-14
Tabla 4.3	Barra de menús y submenús	4-50

Tabla 4.4	Barra de menús y submenús del Modelo Rides	4-53
Tabla 4.5	Barra de menús y submenús del manejador principal del TRANSYT-7F.	4-59
Tabla 4.5	(Continuación) Barra de menús y submenús del manejador principal del TRANSYT-7F	4-60
Tabla 4.6	Barra de menús y submenús del editor de tipos de registros del TRANSYT-7F . . .	4-64
Tabla 4.7	Barra de menús y submenús	4-68
Tabla 4.8	Barra de menús y submenús de los módulos específicos LISA+	4-76
Tabla 4.9	Barra de menús y submenús de los módulos del TSHELL	4-86
Tabla 4.10	Barra de menús y submenús de los módulos del TRAFED (1)	4-89
Tabla 4.11	Barra de menús y submenús del VISSIM	4-97
Tabla 4.12	Barra de menús y submenús de los módulos del PRESYNCHRO	4-101

La ingeniería de tránsito, definida como la rama de la ingeniería de transporte que evalúa el funcionamiento de la infraestructura (oferta) y de los volúmenes de tránsito (demanda), hace necesaria la utilización de software que permita analizar diferentes configuraciones y aspectos que influyen en el funcionamiento. Se han desarrollado diferentes tipos de aplicaciones, desde los más sencillos hasta los más complejos, para realizar con la mayor exactitud posible análisis y evaluaciones de los elementos que intervienen en el problema del tránsito. En el transcurso del tiempo, las aplicaciones de software disponibles han adquirido una dinámica importante en el planteamiento de soluciones al problema del tránsito en los últimos años. Los modelos de análisis del tránsito se han desarrollado mediante herramientas computacionales (software) que, por su versatilidad, permiten al ingeniero especialista analizar situaciones físicas difíciles de estudiar en la vida real. Recientemente se ha incrementado el uso de estos programas (software) en estudios de tránsito llevados a cabo por entidades distritales y por consultores. Este capítulo presenta los aspectos básicos de las diferentes aplicaciones de software disponibles, para aclarar, mencionar y diferenciar estratégicamente las aplicaciones

utilizadas en los proyectos viales específicos en la ingeniería de tránsito.

Este capítulo menciona los principios de las aplicaciones de software, así como sus limitaciones y fortalezas. Así mismo, visualiza de manera global las diferentes herramientas informáticas comerciales que tienen diversas aplicaciones en el tema. Por tanto, no es una guía detallada de los programas.

4.1 SOFTWARE PARA PLANEACIÓN Y EVALUACIÓN (HCS 2000)

4.1.1 Descripción

Las aplicaciones de software utilizadas comúnmente en estrategia son sencillas. En ellas se presentan tablas generalizadas para condiciones prevalecientes de la vía, el tránsito y los dispositivos de control de éste. La principal herramienta informática utilizada en los análisis de estrategia es el HCS 2000, el cual se explica a continuación.

El HCS fue desarrollado por el Centro de Microcomputadores en Transporte (Center for Microcomputers in Transportation: McTrans) de la Universidad de Florida en Gainesville, Estados Unidos, como complemento a la implementación del *Manual de capacidad de carreteras* (HCM). Por lo mis-

mo, es seleccionado para realizar análisis de capacidad y niveles de servicio en todos los tipos de infraestructuras viales.

Esta versión del HCS (versión 4), conocida como HCS 2000, ha tenido diferentes actualizaciones desde el momento en que se comenzó a distribuir comercialmente. El HCS presenta tres niveles de análisis, los cuales se detallan a continuación.

4.1.2 Alcances

4.1.2.1 Análisis operacional

El análisis se enfoca en las condiciones existentes o anticipadas. Como resultado de este análisis, se toman decisiones para emprender mejoras de bajo costo. En algunos casos se establece información acerca de:

- ◆ Configuraciones para uso de carriles
- ◆ Aplicación de dispositivos de control
- ◆ Fases y repartos de tiempos
- ◆ Adición de carriles

Se realizan comparaciones entre diferentes alternativas a corto y mediano plazos. Para este nivel de análisis, es necesario contar con datos detallados. No se usan los valores por defecto.

4.1.2.2 Análisis de diseño

Este nivel de análisis se utiliza para establecer las características físicas detalladas que permitirán a un sistema nuevo o modificado operar a un nivel de servicio deseado. Los proyectos de diseño se realizan para ser implementados a mediano y largo plazos. Se busca determinar con este análisis datos acerca de:

- ◆ Anchos de carriles
- ◆ Pendientes

- ◆ Longitud de carriles adicionales
- ◆ Áreas peatonales

Los datos requeridos para diseño son relativamente detallados y están basados en los atributos del diseño propuesto. Sin embargo, el enfoque a mediano y largo plazos requiere el uso de ciertos valores por defecto.

4.1.2.3 Análisis de planeación

Dirigido hacia las estrategias a largo plazo, requiere varios escenarios de análisis que permitirán predecir el desempeño del sistema. El análisis brinda información acerca de:

- ◆ Posible configuración de un sistema vial o parte de él
- ◆ Impacto de un desarrollo propuesto
- ◆ Pronóstico del comportamiento de un sistema
- ◆ Políticas sobre control de vehículos pesados, usos de carriles, entradas a autopistas y uso de técnicas de manejo de la demanda.

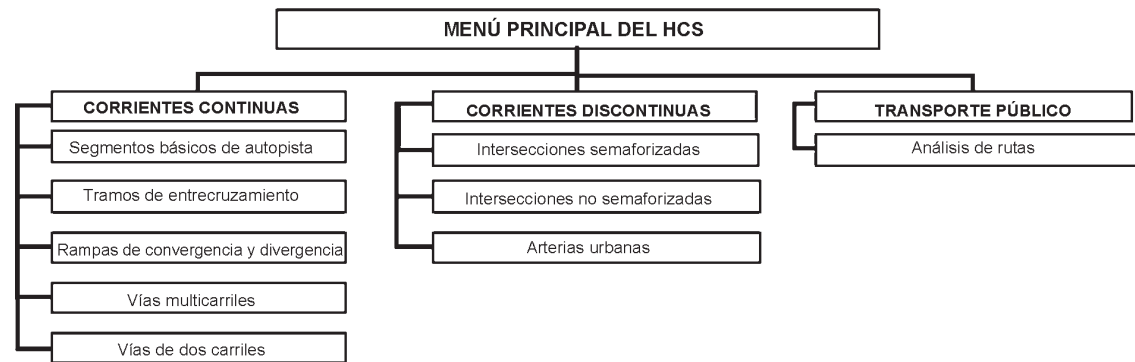
4.1.3 Estructura del HCS

La organización del programa HCS es muy similar a la del manual HCM. En la Figura 4.1 se ilustra la estructura del HCS, que se compone de tres módulos básicos: corrientes de flujo continuo, corrientes de flujo discontinuo y transporte público. De cada uno de estos módulos principales, se desprenden los diversos programas computacionales actuales de análisis del HCS.

4.1.4 Operación del HCS

En esta sección se describen las características fundamentales del programa HCS

Figura 4.1
Estructura
principal del
HCS



Fuente:
Elaboración propia

2000 (HCS versión 4.1e). El HCS presenta diversos módulos de análisis que son visualizados por el usuario a través del uso de menús.

El menú principal, presentado en la Figura 4.2, contiene los tres módulos principales: el análisis de corrientes de flujo continuo, de flujo discontinuo y el análisis de transporte público. Cada uno de los módulos específicos de las diferentes corrientes de análisis presentan relación directa con las infraestructuras de análisis que se pueden estudiar en la versión del HCS. En la Figura 4.3, se observan los diferentes módulos específicos de análisis del HCS.

Los análisis de las diferentes corrientes vehiculares se encuentran relacionados en los archivos que presentan extensiones específicas, como se precisa a continuación.

4.1.4.1 Datos y ruta de datos del HCS

El HCS tiene una estructura de archivos flexible. Está diseñado de tal manera que todos los archivos de programa residen en un subdirectorio que el usuario puede prefijar o definir a medida que realiza los análisis correspondientes; los archivos de datos pueden residir en uno o más subdirectorios diferen-

tes. Esto permite manipular datos sin que se destruyan accidentalmente los archivos de programa

Debido a que los diversos módulos del HCS usan extensiones de archivos únicas, los datos para los diferentes módulos pueden residir en un simple subdirectorio de datos, pero cada módulo específico de análisis solamente despliega sus propios datos en la lista de archivos. La ruta de datos por defecto es la especificada en la pantalla Edit...Settings...Default (Data). Mediante este procedimiento se define la ruta en la que se grabarían los datos, y desde la cual se cargarían, a menos que se especifique otra cosa en la línea de comando. Esta será la ruta desplegada como “subdirectorio” en las pantallas del menú principal.

4.1.4.2 Archivos de datos del HCS

Cada uno de los módulos del HCS mantiene los datos con un nombre de archivo específico, de la siguiente forma:

nombre del archivo.hcn

Donde “nombre del archivo” es el nombre primario asignado y la letra “n” corresponde al módulo de análisis del HCS aplicado al análisis deseado. El formato de datos de cada módulo

es único, por lo que las extensiones de los archivos se generan automáticamente y no deben ser cambiadas. La lista completa de las extensiones de los archivos de datos del HCS se presenta en la Tabla 4.1.

4.1.4.3 Menús específicos del HCS

La información que se presenta en esta sección es de uso genérico para todos los módulos del HCS 2000; sin embargo, los detalles precisos, como los menús de los módulos, pueden variar de acuerdo con cada módulo específico del programa. En la Figura 4.4 se presenta un ejemplo de la configuración general típica de los módulos específicos presentados en el HCS.

Como se puede observar, el HCS está compuesto por las barras de menú y la barra de herramientas, que permiten el manejo y manipulación de archivos de los análisis realizados, efectos de visualización y la ayuda. Además, el HCS presenta dos ventanas principales: la primera se refiere a la entrada de datos del programa; la segunda presenta los reportes de salida de los análisis.

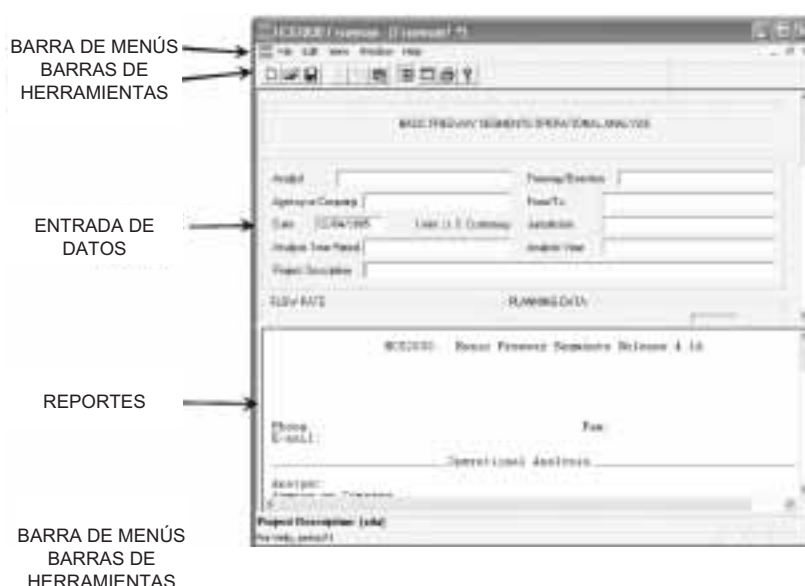


Figura 4.2
Menú principal
del programa
HCS 2000

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
Versión 4.1e

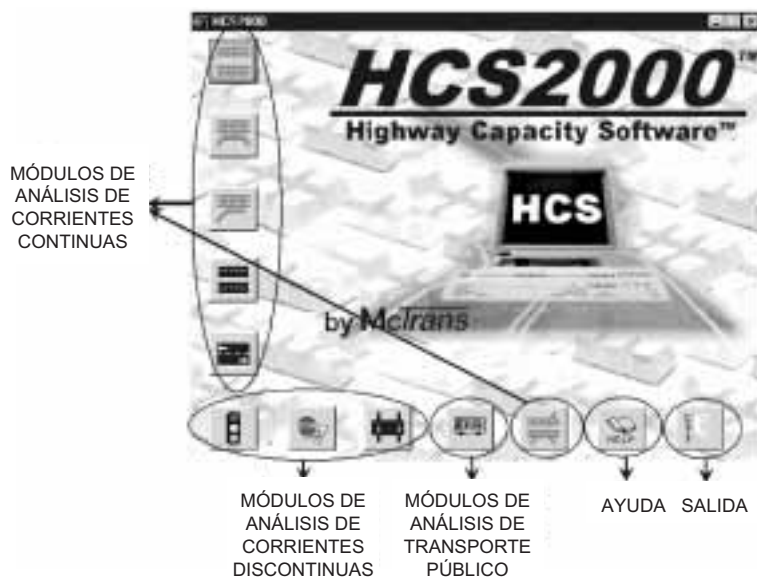


Figura 4.3
Módulos de
análisis del
programa
HCS 2000

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

En la Tabla 4.2 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menú del HCS, para las funciones básicas del programa. Igualmente se presentan iconos especiales en la barra de herramientas, que permiten el acceso directo a funciones específicas como abrir archivos, guardar, cortar, copiar, pegar, imprimir, entre otras. Esto permite al usuario realizar en forma directa

muchos de los procedimientos descritos en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1
Extensiones de archivos de análisis en el HCS 2000.

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa, HCS 2000 Versión 4.1e

Extensión	Módulo de análisis
*.hcf	Segmentos básicos de autopista
*.hcx	Tramos de entrecruzamiento
*.hcr	Rampas de convergencia y divergencia
*.hc2	Vías de dos carriles
*.hcs	Intersecciones semaforizadas
*.hcu	Intersecciones de prioridad
*.hca	Arterias urbanas
*.hct	Transporte público

4.1.5 Módulo de análisis de segmentos básicos de autopista

El módulo de análisis de segmentos básicos de autopista se relaciona con el análisis de corrientes de características de flujo continuo.

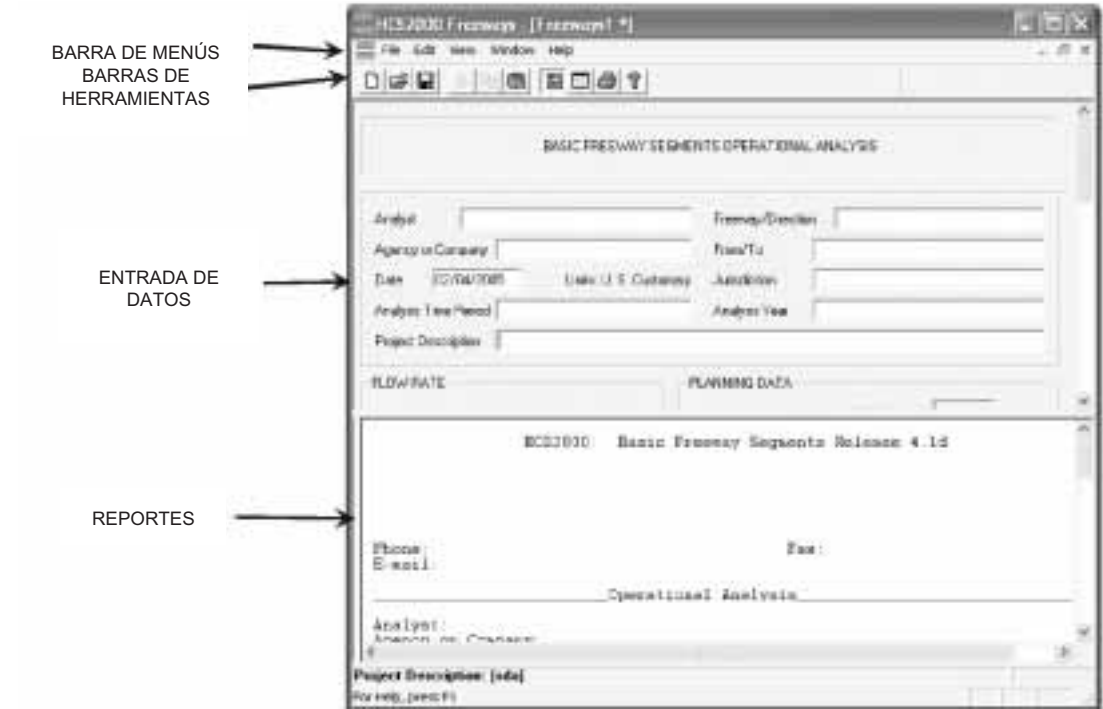
El menú específico se presenta en la Figura 4.5. En el caso de que el usuario opte por iniciar un nuevo análisis, es preciso definir el tipo de análisis que se debe realizar, es decir, si corresponde a un análisis operacional, de diseño o de planeamiento. Luego se debe seleccionar el sistema de unidades que se utilizará, es decir, el sistema métrico o el sistema inglés. Después aparece la presentación del módulo de análisis de segmentos básicos de autopista, compuesto por una sección de información general, una sección de datos de planeamiento, un módulo de ajuste de volúmenes, un módulo de ajuste de velocidad y las salidas del análisis, como se presenta en la Figura 4.6.

4.1.5.1 Descripción de las secciones

Se presenta a continuación la descripción de las principales secciones consideradas en el

Figura 4.4
Configuración general típica

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa, HCS 2000 Versión 4.1e



Menú principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo archivo e inicio de un nuevo proyecto de análisis.
	Open	Abrir un archivo existente.
	Close	Cerrar el archivo existente.
	Save	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Save Report	Grabar el reporte como un archivo de texto. (Disponible solamente cuando el cursor se encuentre en la ventana de visualización del reporte)
	Print	Imprime el reporte a la impresora o a un archivo de texto especificado (Disponible solamente cuando el cursor se encuentre en la ventana de visualización del reporte).
	Print Setup	Selección de impresora y conexión de la impresora.
	Send...	Envío del reporte activo a través de correo electrónico (e-mail).
	Exit	Salida del módulo.
Edit	Undo	Deshacer la operación de edición previa.
	Cut	Borrado de los datos y almacenamiento en el bloc de notas.
	Copy	Copiado de datos en el bloc de notas.
	Paste	Pegado de datos del bloc de notas en el campo de entrada de datos o en el reporte.
	Agency	Permite grabar información de la entidad que realiza el análisis para la impresión de reportes.
View	Restore	Restaura los valores por defecto en todos los campos que tenían valores calculados.
	Toolbar	Permite la visualización o no de la barra de herramientas.
	Status Bar	Permite la visualización o no de la barra de estado.
	Text Report	Permite la visualización o no del reporte de salida del análisis como texto.
	Formatted Reports	Permite la visualización o no del reporte de salida del análisis en formato.
Window	Cascade	Permite la organización de varias ventanas de análisis dentro del módulo de análisis que se tenga activado en cascada.
	Tile Horizontally	Permite la organización de varias ventanas de análisis dentro del módulo de análisis que se tenga activado compartido horizontalmente.
	Tile Vertically	Permite la organización de varias ventanas de análisis dentro del módulo de análisis que se tenga activado compartido verticalmente.
	Split bar	Permite realizar divisiones de las ventanas de entrada de datos y de salida de reportes.
Help	Help Topics	Llama la guía de ayuda
	HCS2000 Updates	Lleva al usuario, a través de Internet a McTrans para revisar nuevas versiones del HCS 2000 para potenciales descargas.
	HCM/HCS2000 Training	Lleva al usuario, a través de Internet, a la página de cursos de McTrans para conocer las últimas noticias al respecto.
	HCM2000 WebBoard	Lleva al usuario, a través de Internet, a la página del TRB HCM2000 para conocer la notificación de modificaciones a páginas erradas del HCM.
	About	Presentación de información general, versión del programa, correo electrónico (e-mail) de McTrans y vínculos a páginas del HCS2000.

Tabla 4.2

Barra de menús y submenús de los módulos específicos del HCS 2000

Fuente:

Elaboración propia con base en el programa, HCS 2000 Versión 4.1e

análisis de los segmentos básicos de autopista de acuerdo con lo presentado en la Figura 4.6.

En la información general se relacionan los datos de interés del proyecto que se está analizando: nombre del profesional que lo ejecuta, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombre de la autopista en análisis, definición de los sitios de origen-destino, lugar y año de análisis del proyecto.

Ajuste de volúmenes

La información de volúmenes de tránsito de interés al proyecto que se está analizando se debe relacionar en este punto. Esta información incluye el volumen horario pico, el factor de hora pico, el número de carriles del segmento analizado, el tipo de terreno, la composición de vehículos pesados y el tipo de conductores. En la Figura 4.7 se presenta en detalle el ajuste de volúmenes.

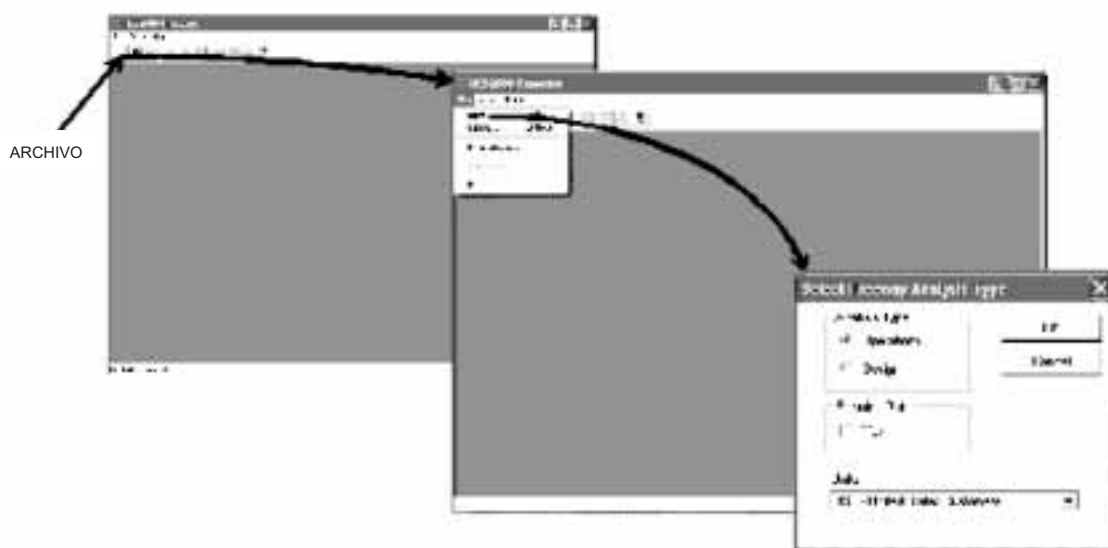
Datos de planeamiento

Se debe relacionar la información correspondiente a los volúmenes de tránsito promedio diarios a partir de la información del patrón de tráfico anual, el factor de proporción de los volúmenes de tránsito diario al volumen horario pico y el factor de distribución direccional (se toma el mayor, por ser el más desfavorable). En la Figura 4.8 se presenta en detalle los datos de planeamiento.

Ajuste de velocidades

Se incluye la velocidad que se tendrá en cuenta para el análisis de segmentos básicos de autopista. Es de anotar que el usuario debe definir si ésta fue medida en campo directamente o si, para la determinación de la velocidad, se parte de una velocidad base, la cual se ajusta al considerar ancho de carriles, distancia a obstáculos laterales, número de intercambios/kilómetro (por ejemplo, un in-

Figura 4.5
Buscando
módulo de
análisis de
segmentos
básicos de
autopista HCS
2000



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

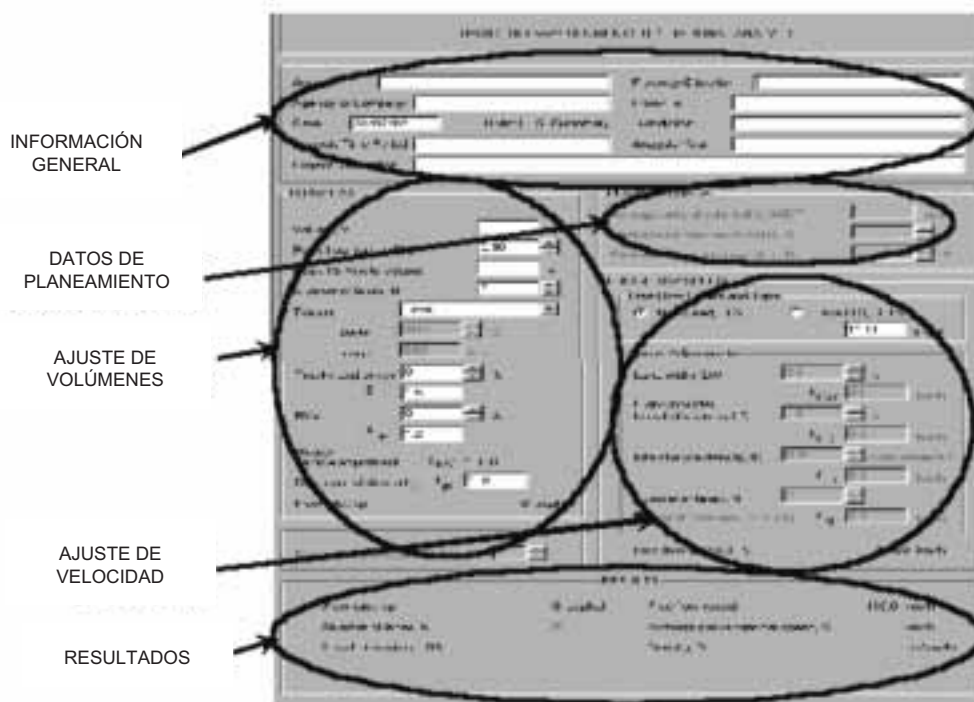


Figura 4.6
Módulo de análisis de segmentos básicos de autopista HCS 2000

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa, HCS 2000 Versión 4.1e

tercambio cada 3.3 kilómetros) y ajuste por entorno urbano, suburbano o rural. En la Figura 4.9 se presenta la pantalla para ajuste de velocidades.

Resultados

Los principales resultados de los análisis incluyen el volumen de tránsito ajustado, la velocidad ajustada, la densidad, la velocidad promedio de los vehículos de pasajeros y el nivel de servicio del segmento básico de autopista analizado. En la Figura 4.10 se presenta el detalle de los resultados de los análisis de segmentos básicos de autopista.

4.1.6 Módulo de análisis de vías multicarriles

El módulo de análisis de vías multicarriles está relacionado con el análisis de corrientes de características de flujo continuo. El menú

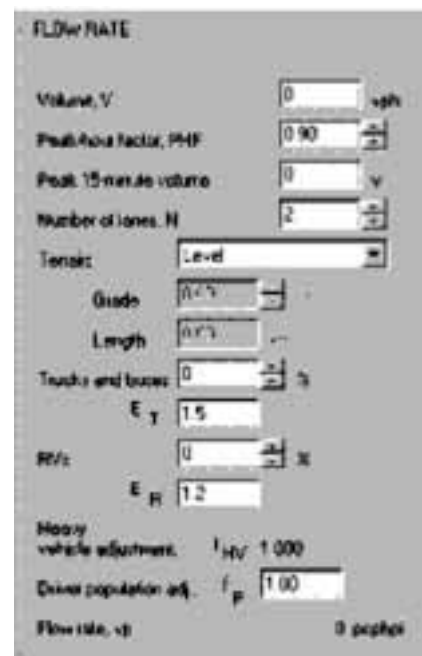


Figura 4.7
Ajuste de volúmenes

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa, HCS 2000 Versión 4.1e

de análisis de vías multicarriles se presenta en la Figura 4.11.

En el caso que el usuario opte por iniciar un nuevo análisis, se debe definir qué

Figura 4.8
Datos de
planeamiento

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa, HCS
2000 Versión 4.1e

PLANNING DATA

Average annual daily traffic, AADT: 0 vpd

Peak hour proportion of AADT, K: 0.09

Peak hour direction proportion, D: 55 %

multicarriles, compuesto por una sección de información general, un módulo de ajuste de volúmenes, un módulo de ajuste de velocidad y las salidas del análisis.

Figura 4.9
Ajuste de
velocidades

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa, HCS
2000 Versión 4.1e

FREE-FLOW SPEED

Free-Flow Speed and Type: ☐ Measured, FFS ☒ Base FFS, BFFS: 90.0 km/h

Speed Adjustments:

Lane width, LW: 3.6 m, f_{LW} : 0.0 km/h

Right-shoulder lateral clearance, LC: 1.8 m, f_{LC} : 0.0 km/h

Interchange density, ID: 0.20 interchange/km, f_{ID} : 0.0 km/h

Number of lanes, N: 2

☒ Rural freeways, $f_n = 0.05$, f_n : 7.3 km/h

Free-flow speed, FFS: 82.7 km/h

4.1.6.1 Descripción de las secciones de análisis de vías multicarriles

Se presenta a continuación la descripción de las principales secciones consideradas en el análisis de vías multicarriles, de acuerdo con la Figura 4.12.

En la sección de información general se relaciona la información de interés del proyecto que se está analizando: empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombre de la vía multicarril en análisis, definición de los sitios de origen-destino, lugar y año de análisis del proyecto.

Ajuste de velocidades

Para el análisis de vías multicarriles, la velocidad puede ser medida en campo para reflejar los efectos de las condiciones que afectan la velocidad. Así mismo, cuando no se mide la velocidad, se debe realizar su estimación al considerar un valor base y los ajustes necesarios por ancho de carriles, distancia a obstáculos laterales, ajuste por tipo de separador y ajuste por puntos de acceso. Es impor-

tipo se desea realizar, es decir, si corresponde a uno operacional, de diseño o de planeamiento. Luego que el usuario lo haya definido, debe seleccionar el sistema de unidades a utilizar: el sistema métrico o el sistema inglés. En seguida aparece la presentación del módulo de análisis de vías

Figura 4.10
Resultados

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

RESULTS			
Flows, vp	1000 veh/h	Free-flow speed	80.0 km/h
Number of lanes, N	2	Average passenger car speed, S	80.0 km/h
Level of service, LOS	C	Density, D	11.1 pcu/km

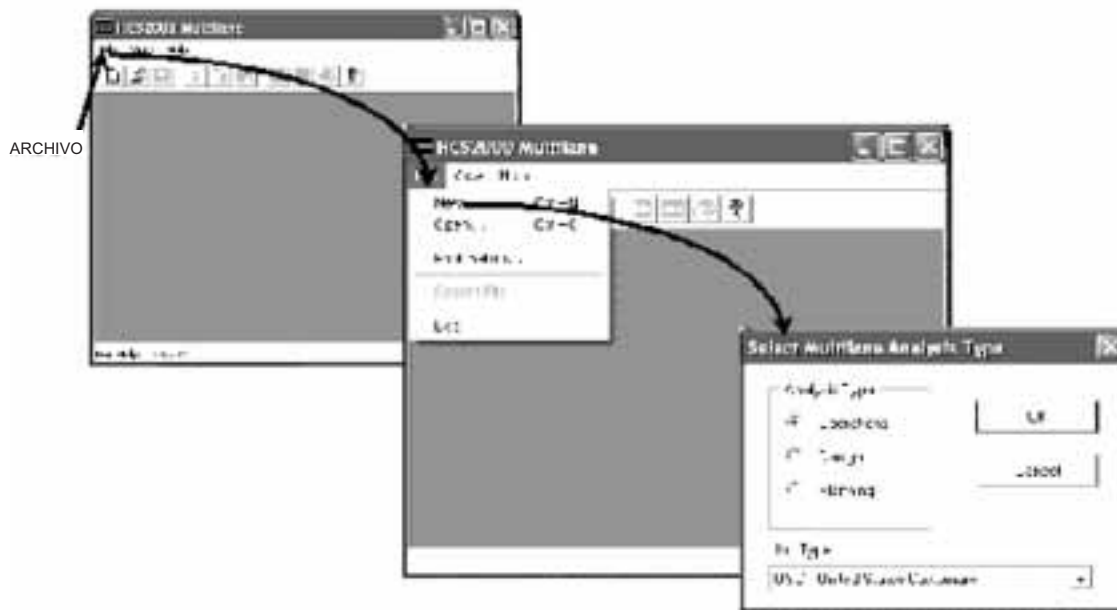


Figura 4.11
Buscando
módulo de
análisis de vías
multicarriles

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

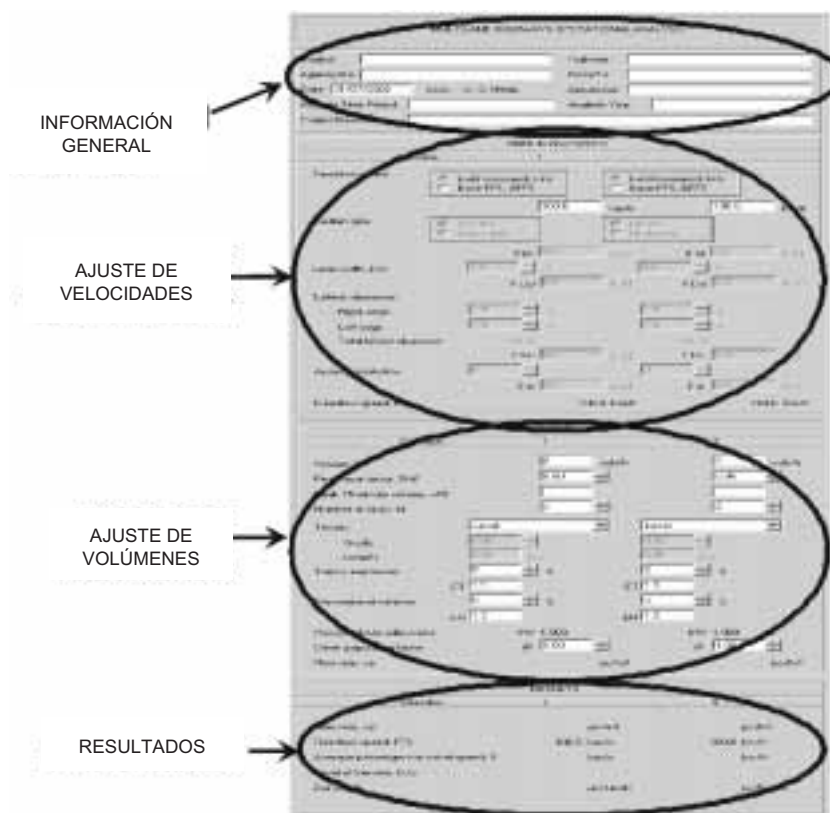


Figura 4.12
Módulo de
análisis

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

tante mencionar que la velocidad se analiza para cada sentido de circulación en la vía multicarril. En la Figura 4.13 se presenta el detalle del ajuste de velocidades.

Ajuste de volúmenes

Se relaciona la información de volúmenes de tránsito de interés al proyecto por cada sentido de circulación identificado que se esté analizando. Esta información incluye el volumen horario pico, el factor de hora pico, el número de carriles de la vía analizada, el tipo de terreno, la composición de vehículos pesados y el tipo de conductores presentados. En la Figura 4.14 se presenta el detalle de la pantalla de ajuste de volúmenes.

Resultados

Se presentan los principales resultados del análisis de vías multicarrilesor por senti-

do de circulación identificado, que incluyen el volumen de tránsito ajustado, la velocidad ajustada, la densidad, la velocidad promedio de los vehículos de pasajeros y el nivel de servicio de la vía multicarril por sentido analizado. En la Figura 4.15 se presenta el detalle de la pantalla de resultados de los análisis de vías multicarriles.

4.1.7 Módulo de análisis de vías de dos carriles

El módulo de análisis de vías de dos carriles está relacionado con el análisis de corrientes de características de flujo continuo. El análisis de vías de dos carriles puede ser bidireccional (al considerar los dos sentidos de circulación) o unidireccional (al considerar solamente un sentido de circulación).

El menú para el análisis de vías de dos carriles se presenta en la Figura 4.16. Allí se debe especificar el tipo de análisis que se requiere y seleccionar el sistema de unidades

Figura 4.13
Ajuste de
velocidades

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

que se utilizará: el sistema métrico o el sistema inglés.

4.1.7.1 Descripción de las secciones de análisis de vías de dos carriles bidireccionales

Se describen las principales secciones consideradas en el análisis de vías de dos carriles bidireccionales, como se observa en la Figura 4.17.

Como información general, se relaciona la información de interés del proyecto que se está analizando: nombre del profesional que lo ejecuta, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombre de la vía de dos carriles en análisis, definición de los sitios de origen-destino, lugar y año de análisis del proyecto.

Direction	1	2
Volume, V	0 veh/h	0 veh/h
Peak hour factor, PHF	0.90	0.90
Peak 15-minute volume, v15		
Number of lanes, N	2	2
Terrain:	Level	Level
Grade	0.00	0.00
Length	0.00	0.00
Trucks and buses	0 %	0 %
ET	1.5	1.5
Recreational vehicles	0 %	0 %
ER	1.2	1.2
Heavy vehicle adjustment	HV 1.000	HV 1.000
Driver population factor	PF 1.00	PF 1.00
Flow rate, vp		

Figura 4.14
Ajuste de volúmenes

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Direction	1	2
Flow rate, vp	pc/h/ft	pc/h/ft
Free-flow speed, FFS	100.0 km/h	100.0 km/h
Average passenger car travel speed, S	km/h	km/h
Level of Service, LOS	F	F
Density, D	pc/km/h	pc/km/h

Figura 4.15
Resultados

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

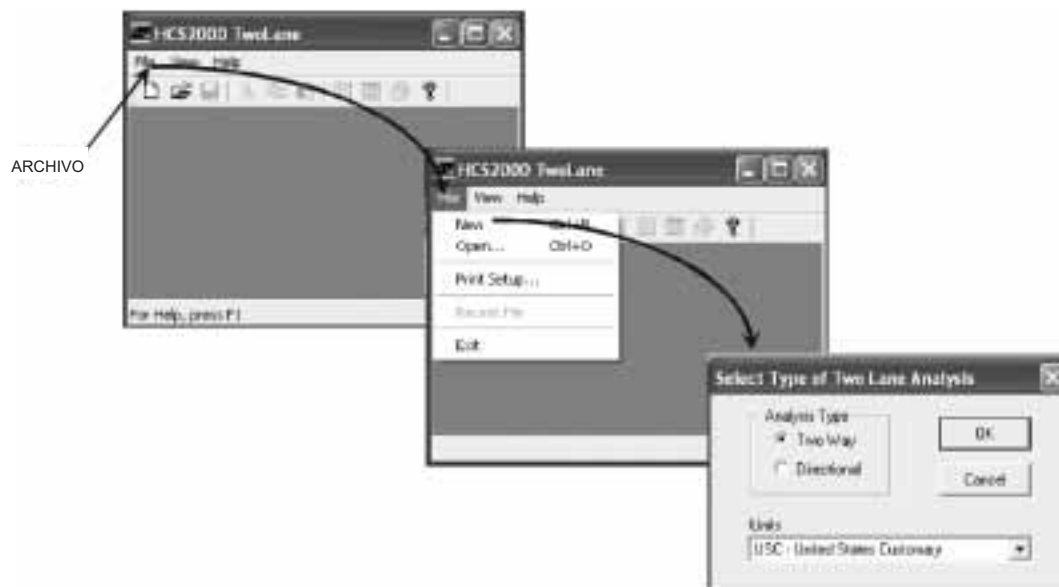


Figura 4.16
Buscando
módulo de
análisis de vías
de dos carriles
bidireccionales

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Figura 4.17
Módulo de
análisis de vías
bidireccionales

INFORMACIÓN GENERAL

ENTRADA DE DATOS

VELOCIDAD MEDIA DE VIAJE

PORCENTAJE DE TIEMPO EMPLEADO EN ADELANTAMIENTO

RESULTADOS

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1

Entrada de datos

Se presenta la información básica del proyecto: ancho de bermas, ancho de carriles, longitud del segmento en análisis, tipo de vía de dos carriles (tipo I o tipo II, acorde con las características de conexión de larga distancia o de corto recorrido que presente la vía), tipo de terreno, volumen horario en los dos sentidos, factor de distribución direccional, factor de hora pico, porcentaje de buses y camiones, porcentaje de vehículos recreacionales, porcentaje de zonas de no adelanta-

miento y puntos de acceso por kilómetro. En la Figura 4.18 se presenta el detalle de entrada de datos.

Velocidad media de viaje

A partir de los factores de equivalencia, velocidad a flujo libre, número de accesos por kilómetro y otros parámetros, se determina la velocidad media de viaje. En la Figura 4.19 se presenta el detalle de la estimación de la velocidad media de viaje.

Porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento

En este módulo se establecen los factores que intervienen en la determinación del porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento. Se establecen los factores que intervienen en el ajuste de los volúmenes de tránsito y los cálculos del porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento base. En la Figura 4.20 se presenta el detalle del porcen-

taje de tiempo empleado en adelantamiento en vías de dos carriles bidireccionales.

Resultados

De acuerdo con la información del módulo de velocidad media de viaje y del porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento, se establece el nivel de servicio de la vía de dos carriles, teniendo en cuenta la clasificación de la misma, es decir, si es Clase I o Clase II.

Input Data

Shoulder Width	1.8	m	Two-Way Hourly Volume, V	0	vph
Lane Width	3.6	m	Directional Split	60 / 40	
Segment Length	0.0	km	Peak-Hour Factor, PHF	0.88	
☒ Class I Highway	☐ Class II Highway		Trucks and Buses	14	%
Terrain: ☒ Level	☐ Rolling		Recreational Vehicles	4	%
			Percent No-Passing Zones	0	%
			Access Points	5	/ km

Figura 4.18

Entrada de datos en vías bidireccionales

Fuente:

Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Average Travel Speed

Grade Adjustment Factor, f_G	1.00	Heavy Vehicle Adjustment, f_{HV}	0.911
Passenger-Car Equivalents for Trucks, E_T	1.7	Two-Way Flow Rate, v_p	0 pc/h
Passenger-Car Equivalents for RVs, E_R	1.0	Highest Directional Flow Rate	0 pc/h

Free-Flow Speed

☐ Measured ☒ Estimated

Measured Speed, S_{FM}		km/h	Base Free Flow Speed	100.0	km/h
Observed Flow Rate, V_f		pc/h	Lane and Shoulder Width Adjustment, f_{LS}	0.0	km/h
			Access Point Adjustment, f_A	3.3	km/h
Free-Flow Speed, FFS	96.7	km/h			
Adj for No-Passing Zones, f_{np}	0.0	km/h			
Average Travel Speed, ATS	96.7	km/h			

Figura 4.19

Velocidad media de viaje en vías bidireccionales

Fuente:

Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Figura 4.20
Porcentaje de
tiempo
empleado en
adelantamiento
en vías
bidireccionales

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Percent Time Spent Following			
Grade Adjustment Factor, I_G	1.00	Two-Way Flow Rate, v_p	0 pc/h
Passenger-Car Equivalents for Trucks, E_T	1.1	Highest Directional Flow Rate	0 pc/h
Passenger-Car Equivalents for RVs, E_R	1.0	Base Percent Time Spent Following	0.0 %
Heavy Vehicle Adjustment, I_{HV}	0.966	Adj. for Directional Distribution and No-Passing Zones, $I_{d/np}$	1.6 %
Percent Time Spent Following, PTSF		1.6 %	

De la misma forma, se obtienen los demás parámetros de funcionamiento. En la Figura 4.21 se presenta el detalle de los resultados de los análisis de vías de dos carriles bidireccionales.

4.1.7.2 Descripción del módulo de análisis de vías de dos carriles Análisis unidireccional

El menú del módulo de análisis de vías de dos carriles unidireccionales se presenta en la Figura 4.22. Una vez se haya desplegado el menú específico correspondiente, se define el tipo de análisis a realizar (bidireccional o unidireccional). En este caso se sigue el procedimiento para el análisis unidireccional.

La Figura 4.23, que identifica las secciones de información, describe las principales secciones consideradas en el análisis de vías de dos carriles unidireccionales.

Como información general se relacionan los datos de interés del proyecto que se está analizando, como nombre del profesional que lo ejecuta, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombre de la vía de dos carriles de análisis, definición de los sitios de origen-destino, lugar y año de análisis del proyecto.

Entrada de datos

Se presenta la información básica del proyecto: ancho de bermas, ancho de carriles, longitud del segmento en análisis, tipo de vía de dos carriles (I o II), tipo de terreno, volumen horario, factor de hora pico, porcentaje de buses y camiones, porcentaje de vehículos recreacionales, porcentaje de zonas de no adelantamiento y puntos de acceso por kilómetro. En la Figura 4.24 se presenta el detalle del módulo de entrada de datos.

Figura 4.21
Resultados del
análisis en vías
bidireccionales

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Level of Service Determination (if not LOS F)			
Level of Service, LOS	A	Volume to Capacity Ratio, v/c	0.00
Peak 15-minute Vehicle-Kilometers of Travel, V_{kmT15}			0 veh-km
Peak-Hour Vehicle-Kilometers of Travel, V_{kmT60}			0 veh-km
Peak 15-Minute Total Travel Time, TT_{15}			0.0 veh-km



Figura 4.22
Buscando
módulo de
análisis en vías
unidireccionales

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS 2000
Versión 4.1e

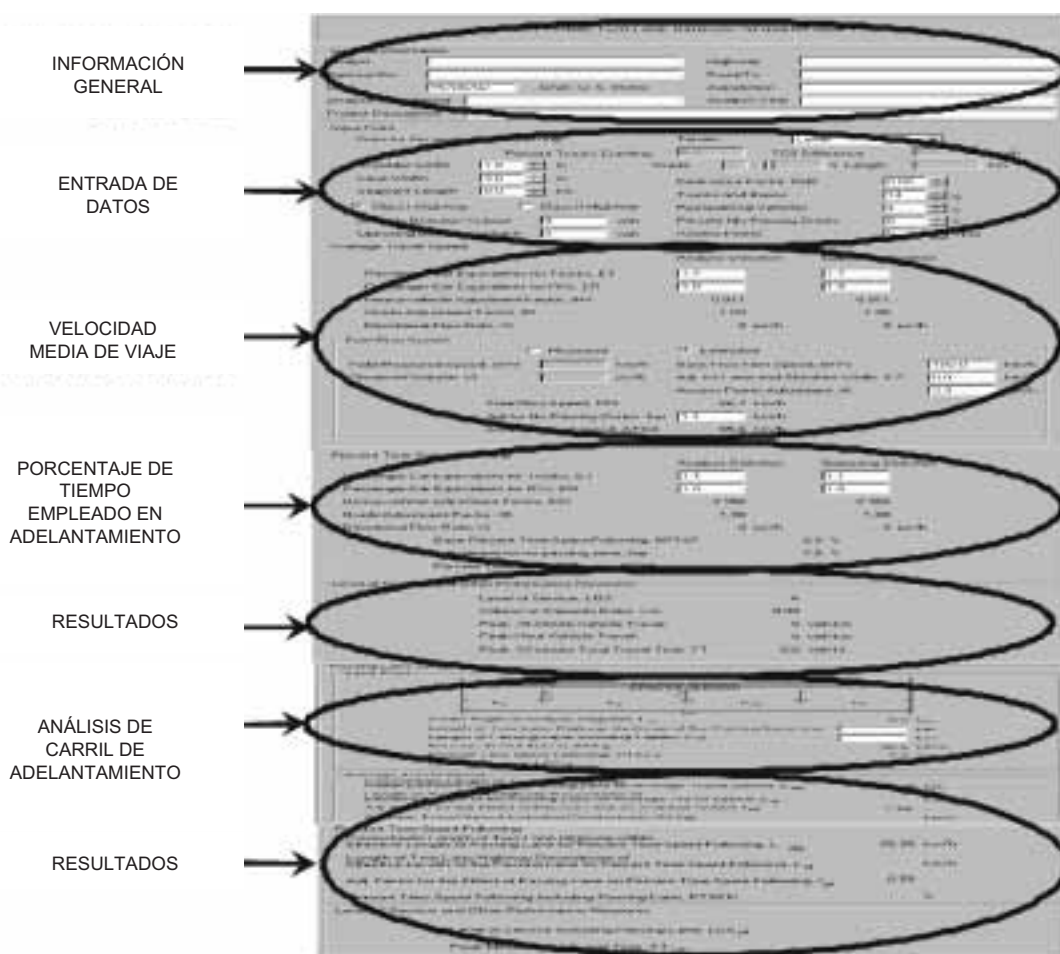


Figura 4.23
Módulo de
análisis de vías
de dos carriles
unidireccionales

Fuente: Elaboración
propia con base en el
programa HCS 2000
Versión 4.1e

Figura 4.24
Entrada de datos
de vías
unidireccionales

Fuente: Elaboración
propia con base en el
programa HCS 2000
Versión 4.1e

Input Data

Data for the analysis direction only.

Terrain: Rolling

Percent Trucks Crawling: 0.0 TCS Difference: 0.0 km/h

Shoulder Width: 1.8 m

Grade: - 0.0 % Length: 0.0 km

Lane Width: 3.6 m

Peak Hour Factor, PHF: 0.88

Segment Length: 0.0 km

Trucks and Buses: 14 %

☒ Class I Highway ☐ Class II Highway

Recreational Vehicles: 4 %

Analysis Direction Volume: 0 vph

Percent No-Passing Zones: 0 %

Opposing Direction Volume: 0 vph

Access Points: 5 /km

Velocidad media de viaje

A partir de los factores de equivalencia, velocidad a flujo libre, número de accesos por kilómetro y otros parámetros, se determina la velocidad media de viaje. En la Figura 4.25 se presenta el detalle de la velocidad media de viaje.

Porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento

Se establecen los factores que intervienen en la determinación del porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento, así como los factores que intervienen en el ajuste de los volúmenes de tránsito y los cálculos

Figura 4.25
Velocidad media
de viaje en vías
unidireccionales

Fuente: Elaboración
propia con base en el
programa HCS 2000
Versión 4.1e

Average Travel Speed

	Analysis Direction	Opposing Direction
Passenger-Car Equivalents for Trucks, ET	2.5	2.5
Passenger-Car Equivalents for RVs, ER	1.1	1.1
Heavy-vehicle Adjustment Factor, fHV	0.824	0.824
Grade Adjustment Factor, fG	0.71	0.71
Directional Flow Rate, Vi	0 pc/h	0 pc/h

Free-Flow Speed

☐ Measured ☒ Estimated

Field Measured Speed, SFM: 0 km/h

Base Free-Flow Speed, BFFS: 100.0 km/h

Observed Volume, Vi: 0 pc/h

Adj. for Lane and Shoulder Width, fLW: 0.0 km/h

Access Points Adjustment, fA: 3.3 km/h

Free-Flow Speed, FFS: 96.7 km/h

Adj for No-Passing Zones, fnp: 1.1 km/h

Average travel speed, ATSD: 95.6 km/h

del porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento base. En la Figura 4.26 se presenta el detalle del porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento en vías de dos carriles unidireccionales.

Resultados

De acuerdo con la información del módulo de velocidad media de viaje y del porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento, se establece el nivel de servicio de la vía de dos carriles, teniendo en cuenta la clasificación de la misma, es decir, si es Clase I o Clase II. De la misma forma, se obtienen los demás parámetros de funcionamiento. En la Figura 4.27 se presenta el detalle de resul-

tados de los análisis de vías de dos carriles unidireccionales.

Análisis de carril de adelantamiento

Teniendo en cuenta que el análisis realizado se refiere al análisis direccional de una vía de dos carriles y basándose en la información considerada en los cuatro módulos anteriores, se presenta el análisis de carriles de paso, considerando longitudes de desarrollo del carril de adelantamiento a partir del inicio del tramo unidireccional de análisis. En este análisis se incluye la determinación de los resultados, así como el nivel de servicio al considerar el carril de adelantamiento. En la Figura 4.28 se pre-

Percent Time Spent Following		
	Analysis Direction	Opposing Direction
Passenger-Car Equivalents for Trucks, ET	1.8	1.8
Passenger-Car Equivalents for RVs, ER	1.0	1.0
Heavy-vehicle Adjustment Factor, IHV	0.899	0.899
Grade Adjustment Factor, IG	0.77	0.77
Directional Flow Rate, Vi	0 pc/h	0 pc/h
Base Percent Time Spent Following, BPTSF	0.0 %	
Adjustment for no-passing zone, Inp	7.8 %	
Percent Time Spent Following, PTSF	7.8 %	

Figura 4.26
Porcentaje de tiempo empleado en adelantamiento en vías unidireccionales

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

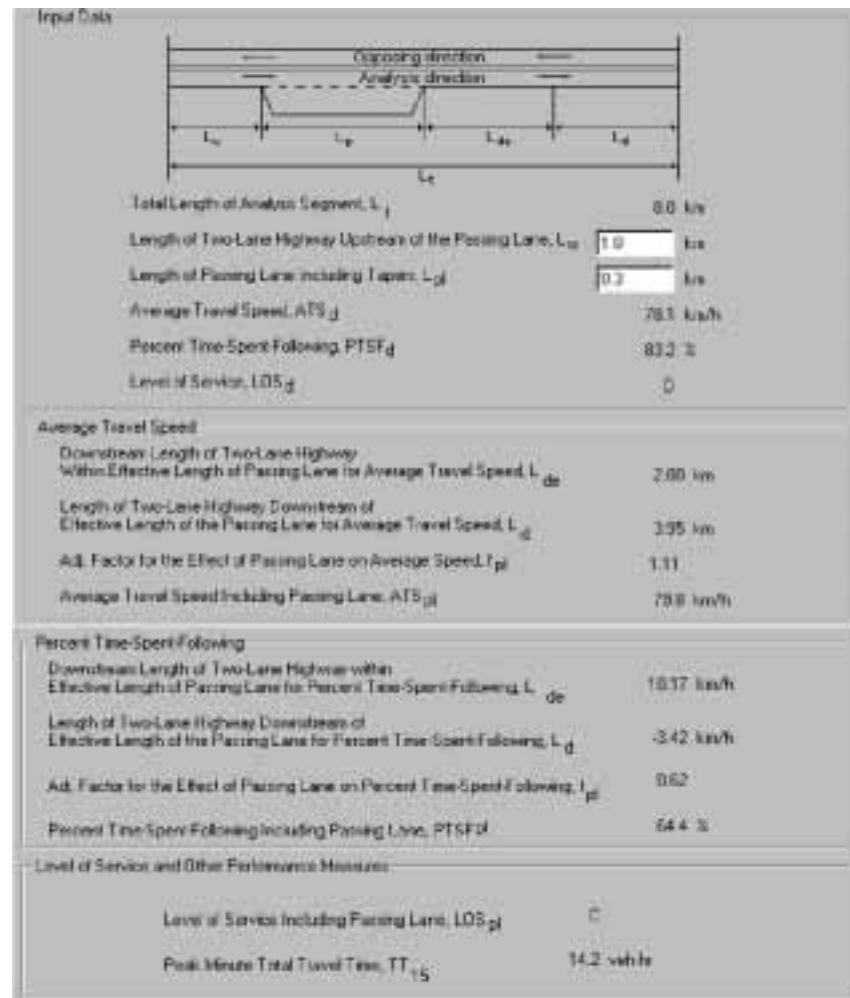
Level of Service and Other Performance Measures	
Level of Service, LOS	A
Volume-to-Capacity Ratio, v/c	0.00
Peak 15-minute Vehicle Travel	0 veh-km
Peak-Hour Vehicle Travel	0 veh-km
Peak 15-minute Total Travel Time, TT	0.0 veh-hr

Figura 4.27
Resultados del análisis de vías unidireccionales

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Figura 4.28

Análisis de
carril de
adelantamiento
en vías
unidireccionales



Fuente:

Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

senta el detalle del análisis de carril de adelantamiento en vías de dos carriles unidireccionales.

pecífico correspondiente, se define el tipo de análisis a realizar (rampa de convergencia o rampa de divergencia).

4.1.8 Módulo de análisis de rampas de convergencia y divergencia

El módulo de análisis de rampas de convergencia y divergencia está relacionado con el análisis de corrientes de características de flujo continuo.

El menú para el análisis de rampas de convergencia y divergencia se presenta en la Figura 4.29. Una vez desplegado el menú es-

4.1.8.1 Descripción de las secciones de análisis de rampas de convergencia y divergencia

El módulo de análisis de la rampa de convergencia o de divergencia está compuesto por una sección de información general, un módulo de entrada de datos, un módulo de ajuste de volúmenes y por las salidas del análisis, como se presenta en la Figura 4.30.

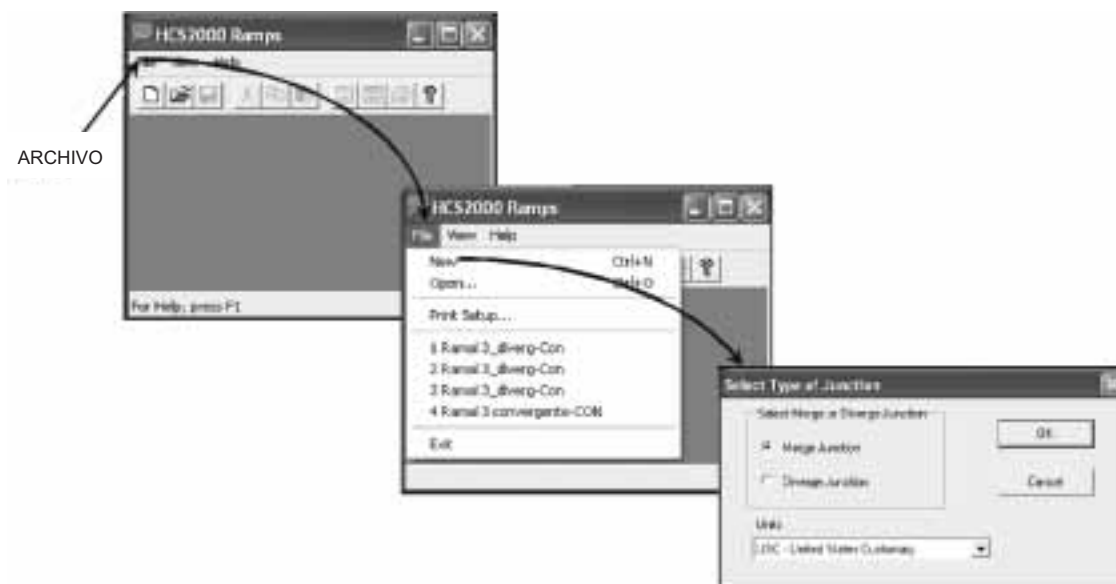


Figura 4.29
Buscando
módulo de
análisis de
rampas de
convergencia y
divergencia

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

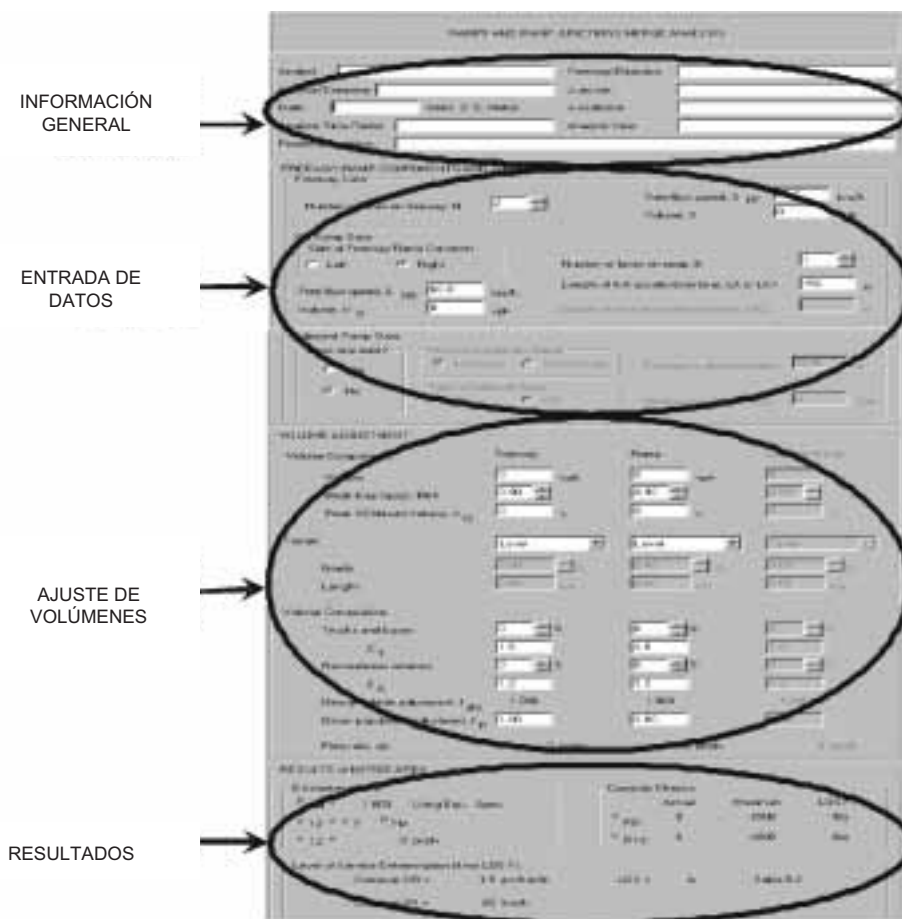


Figura 4.30
Módulo de
análisis de
rampas de
convergencia y
divergencia

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Como información general, se relaciona la información de interés del proyecto que se está analizando: nombre del profesional que lo ejecuta, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombre de la autopista en análisis, definición de los sitios de origen-destino, lugar y año de análisis del proyecto.

A continuación se describen las principales secciones consideradas en el análisis de rampas de convergencia y divergencia.

Entrada de datos

Se presenta la información de los volúmenes de tránsito de la autopista y de la rampa, así como la velocidad de la autopista y de la rampa. Se establece también el número de carriles de la autopista y de la rampa, y la posible longitud de un carril de aceleración o desaceleración. En el caso que se presenten rampas adyacentes, se debe ingresar el dato referente a la distancia y el volumen de dicha

rampa. En la Figura 4.31 se presenta el detalle de la entrada de datos.

Ajuste de volúmenes

Teniendo como base la información de los volúmenes de tránsito que se presentan en la autopista y en la rampa, se debe realizar un ajuste de estos valores al considerar el factor de hora pico, la presencia de volúmenes de tránsito, la población de conductores y las características del terreno. En la Figura 4.32 se presenta el detalle del módulo de ajuste de volúmenes.

Resultados

Se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado, así como la información en los carriles 1 y 2 de la autopista. Igualmente debe verificarse la capacidad máxima que se presenta, el cálculo de la densidad, la velocidad y la determinación

Figura 4.31
Entrada de datos del módulo de análisis de rampas de convergencia y divergencia

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Volume Components:	Freeway	Ramp	Adjacent Ramp
Volume	0 vph	0 vph	0 vph
Peak-hour factor, PHF	0.90	0.90	0.90
Peak 15-Minute Volume, V_{15}	0 v	0 v	0 v
Terrain:	Level	Level	Level
Grade	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Length	0.00 km	0.00 km	0.00 km
Volume Composition			
Trucks and buses	0 %	0 %	0 %
E_T	1.5	1.5	1.5
Recreational vehicles	0 %	0 %	0 %
E_R	1.2	1.2	1.2
Heavy vehicle adjustment, I_{HV}	1.000	1.000	1.000
Driver population adjustment, I_P	1.00	1.00	1.00
Flow rate, vp	0 pcph	0 pcph	0 pcph

Figura 4.32
Ajuste de volúmenes en rampas de convergencia y divergencia

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

del nivel de servicio. En la Figura 4.33 se presenta el detalle del módulo de resultados de los análisis de rampas de convergencia y divergencia.

4.1.9 Módulo de análisis de tramos de entrecruzamiento

El módulo de análisis de tramos de entrecruzamiento está relacionado con el análisis de corrientes de características de flujo continuo.

El menú para el análisis de tramos de entrecruzamiento se presenta en la Figura 4.34. Una vez desplegado el menú específico correspondiente, se procede a iniciar un nuevo análisis.

En caso que el usuario opte por iniciar un nuevo análisis, se debe definir el tipo de análisis que se realizará, es decir, si corres-

ponde a un tramo de entrecruzamiento tipo A, B o C. Luego se debe verificar si la vía en la cual se realiza el análisis es multicarril. Igualmente se debe seleccionar el sistema de unidades a utilizar: el sistema métrico o el sistema inglés.

4.1.9.1 Descripción de las secciones de análisis de tramos de entrecruzamiento

Como información general se relaciona la información de interés del proyecto que se está analizando: nombre del profesional que lo ejecuta, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombre de la vía en análisis, definición de los sitios de origen-destino, lugar y año de análisis del proyecto.

Figura 4.33
Resultados del
módulo de
rampas de
convergencia y
divergencia

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e



Se presenta a continuación la descripción de las principales secciones consideradas en el análisis de tramos de entrecruzamiento de acuerdo a lo presentado en la Figura 4.35.

Entrada de datos

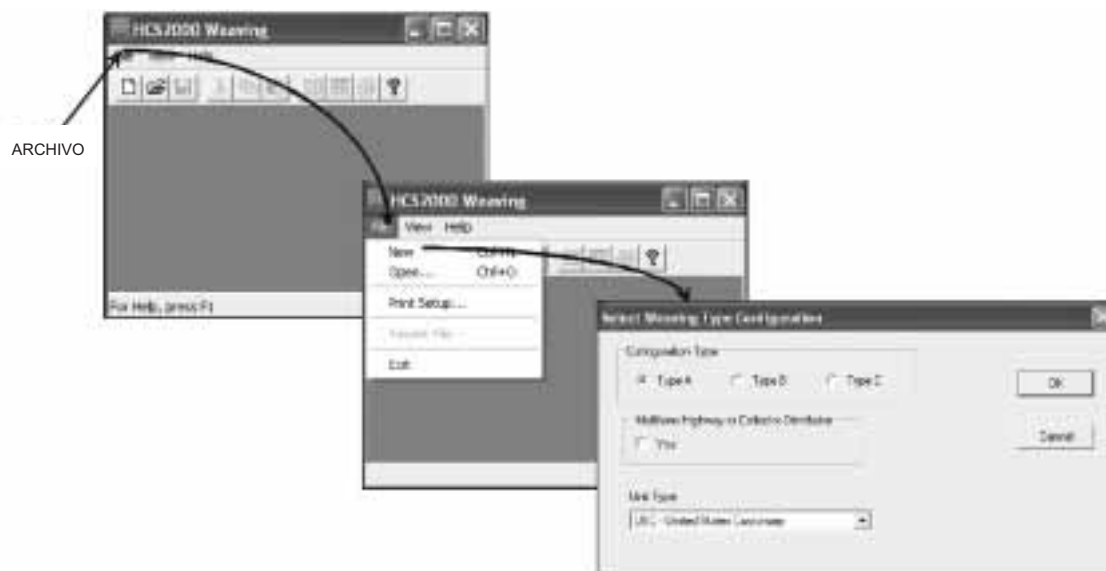
Se presenta la información sobre las características del entrecruzamiento: el número de carriles, la longitud del tramo de entrecruzamiento, la velocidad a flujo libre y

el tipo de terreno. En la Figura 4.36, se presenta el detalle de entrada de datos.

Ajuste de volúmenes

Teniendo como base la información de los volúmenes de tránsito que se presentan en la autopista y en el tramo de entrecruzamiento, se deben ajustar estos mismos valores al considerar el factor de hora pico, la presencia de volúmenes de tránsito, la población de conductores y las características del

Figura 4.34
Buscando
módulo de
análisis de
tramos de
entrecruza-
miento



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

INFORMACIÓN GENERAL

ENTRADA DE DATOS

AJUSTE DE VOLÚMENES

RESULTADOS

Figura 4.35
Módulo de análisis de tramos de entrecruzamiento

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

terreno. En la Figura 4.37, se presenta el detalle del ajuste de volúmenes.

Resultados

Teniendo como base la información ajustada de los volúmenes de tránsito y del

tipo de operación, se determina el factor de intensidad de entrecruzamiento, las velocidades y la densidad de la operación del tramo de entrecruzamiento y se halla el nivel de servicio. En la Figura 4.38 se presenta el detalle del módulo de resultados de los análisis de rampas de convergencia y divergencia.

ROADWAY CONDITIONS

Weaving type: Type A

Weaving number of lanes, N: 4

Weaving segment length, L: 500 m

Freeway free-flow speed, SFF: 110 km/h

Terrain: Level

Grade: 0.00 %

Length: 1.00 km

Figura 4.36
Entrada de datos del módulo de tramos de entrecruzamiento

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Figura 4.37
Ajuste de volúmenes en tramos de entrecruzamiento

Volume Components

Non-Weaving Volumes

V_{A-C}

V_{B-D}

Weaving Volumes

V_{B-C}

V_{A-D}

	V_{A-C}	V_{B-D}	V_{A-D}	V_{B-C}
Volume				
Peak-hour factor, PHF	0.90	0.90	0.90	0.90
Peak 15-minute volume, V15				

Volume Composition and Adjustments

	V_{A-C}	V_{B-D}	V_{A-D}	V_{B-C}
Trucks and buses	0	0	0	0
E_T	1.5	1.5	1.5	1.5
Recreational vehicles	0	0	0	0
E_R	1.2	1.2	1.2	1.2
Heavy vehicle adjustment, fHV	1.000	1.000	1.000	1.000
Driver population adjustment, fP	1.00	1.00	1.00	1.00

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

4.1.10 Módulo de análisis de intersecciones semaforizadas

El módulo de análisis de intersecciones semaforizadas está relacionado con el análisis de corrientes de características de flujo discontinuo.

El menú para el análisis de intersecciones semaforizadas se presenta en la Figura 4.39. Una vez desplegado el menú específico co-

respondiente, se procede a iniciar un nuevo análisis.

4.1.10.1 Descripción de las secciones de análisis de intersecciones semaforizadas

Como información general se relaciona los datos de interés del proyecto que se está analizando: nombre del profesional que lo

Figura 4.38
Resultados del módulo de tramos de entrecruzamiento

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

RESULTS			
Weaving type	Type A	Type of Operation	Unconstrained
Weaving segment speed, S	km/h	Weaving intensity factor, W	Weaving Non-Weaving
Weaving segment density, D	pc/km/h	Speeds, S	km/h km/h
Level of service, LOS		Base capacity for base conditions maximum 15-min flow rates	pc/h



Figura 4.39
Módulo de
análisis de
intersecciones
semaforizadas

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

ejecuta, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, descripción de la intersección y localización, nombres de las vías que forman la intersección en cada uno de los sentidos presentados (Oriente a Occidente o Norte a Sur), definición de localización de la intersección en zona central de la ciudad o no, lugar y año de análisis del proyecto.

Se presenta a continuación la descripción de las principales secciones consideradas en el análisis de intersecciones semaforizadas de acuerdo con lo presentado en la Figura 4.40.

Entrada de datos geométricos y volúmenes

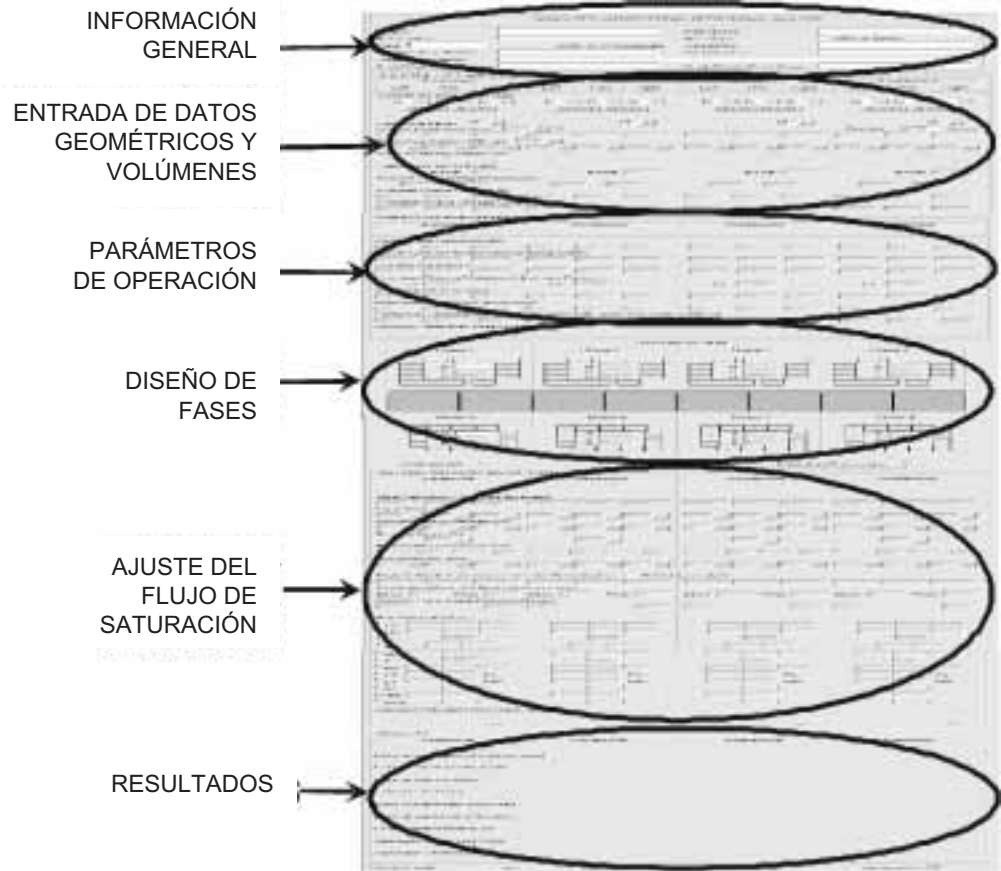
Se relaciona la información de volúmenes de tránsito acorde con los accesos de la intersección. La información requerida incluye el número de carriles de cada movimiento registrado (izquierda, directo o derecha) en la intersección; se debe especificar si los carriles son compartidos o no. Con respecto a la información de los volúmenes

de tránsito, se ingresa el volumen horario pico y el factor de hora pico por movimiento. Se debe registrar el volumen de vehículos en la hora de análisis correspondiente a giros a la derecha, el porcentaje de giros presentados cuando el carril se encuentra compartido, el valor del espaciamiento promedio entre los vehículos que se encuentran formando parte de la cola de la intersección y la longitud disponible de almacenamiento de colas en cada uno de los movimientos presentados como se definieron inicialmente. En la Figura 4.41 se presenta el detalle de entrada de datos geométricos y de volúmenes.

Parámetros de operación

En este módulo se debe relacionar la información correspondiente a las condiciones locales de operación. La información que se debe contemplar considera los volúmenes de tránsito de demanda que no fue atendida. Se debe definir el tipo de arribo, las unidades de extensión del control, el factor de influencia de intersecciones corriente arriba, el tiempo perdido en la arrancada de los vehículos al

Figura 4.40
Módulo de
análisis de
intersecciones
semaforizadas



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Figura 4.41
Datos
geométricos y
de volúmenes
de análisis de
intersecciones
semaforizadas

GEOMETRY and VOLUME

Eastbound Westbound Northbound Southbound

Left Thru Right Left Thru Right Left Thru Right Left Thru Right

Number of Lanes and Usage

Receiving Lanes

Volume (vph, 15-minute)

Peak Hour Factor, PHF, All

Peak 15 Minute Volume (v)

Right Turns on Red (hph)

Right Turns Using Shared Lane

Average Queue Spacing (ft)

Available Queue Storage Length (ft)

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

inicio de la fase, la extensión del tiempo de verde y los datos del cruce peatonal (velocidad promedio de los peatones, longitud del cruce de los peatones y el ancho del cruce peatonal establecido) con lo cual se determina el mínimo tiempo de verde de los peatones, en segundos. En la Figura 4.42 se presenta el detalle del módulo de datos de planeamiento.

Diseño de fases

La información que se debe incluir en este módulo se refiere a las fases en las cuales se encuentran agrupados los movimientos definidos previamente. Se incluye la información del tiempo de verde de cada fase, el tiempo de amarillo y el tiempo de rojo. Se pueden incluir los movimientos peatonales presentados en la intersección. En los análisis se pueden incluir hasta cuatro fases distri-

buidas en las direcciones Norte-Sur y Sur-Norte, así como cuatro fases distribuidas para los movimientos Oriente-Occidente y Occidente-Oriente. En la Figura 4.43 se presenta el detalle de datos de diseño de fases.

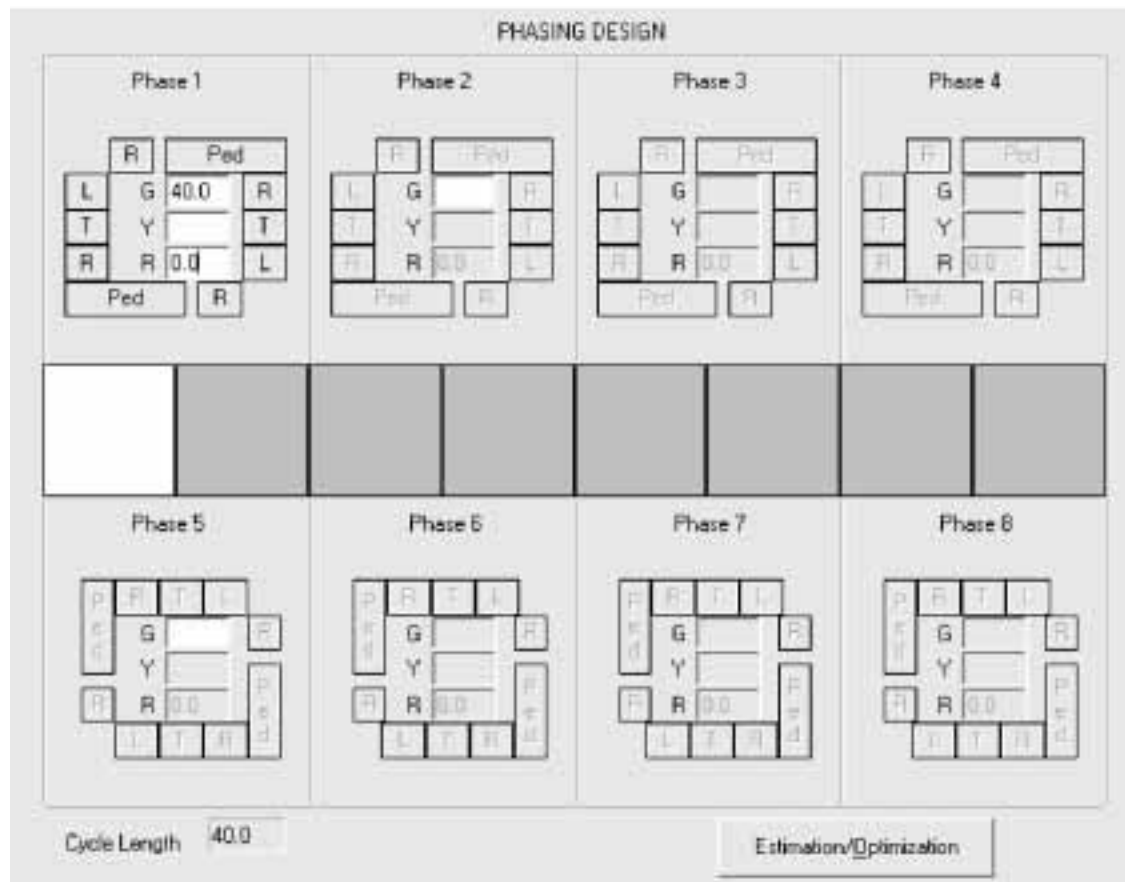
Ajuste de flujo de saturación

El ajuste del flujo de saturación es el ajuste del flujo en vehículos por hora que se pueden acomodar en el grupo de carriles, asumiendo que la fase verde está disponible el 100% del tiempo. Este flujo se ajusta partiendo de un flujo base, considerando el número de carriles por grupo y teniendo en cuenta los factores de ajuste por ancho de carril, por presencia de vehículos pesados, por pendiente en el acceso, por existencia de carriles de parqueo y su actividad, por el efecto de bloqueo de buses, por el tipo de área, por el uso de carriles, por giros a la izquierda, por

Figura 4.42
Parámetros de
operación de
análisis de
intersecciones
semaforizadas

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Figura 4.43
Diseño de
fases de
análisis de
intersecciones
semaforizadas



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

giros a derecha, por presencia de peatones en giros izquierdos y el factor de ajuste de peatones y bicicletas para giros a la derecha. En la Figura 4.44 se presenta el detalle del ajuste del flujo de saturación para el análisis de intersecciones semaforizadas.

Resultados

Se presentan los principales resultados del análisis de intersecciones semaforizadas, que incluyen el volumen de tránsito ajustado, la capacidad por carril, la relación volumen/capacidad, la capacidad del grupo crítico de carriles y el nivel de servicio por acceso y de la intersección en general. En la Figura 4.45 se presenta el detalle de

resultados de los análisis de intersecciones semaforizadas.

4.1.11 Módulo de análisis de intersecciones no semaforizadas

El módulo de análisis de intersecciones no semaforizadas está relacionado con el análisis de corrientes de características de flujo discontinuo. El menú de análisis de intersecciones no semaforizadas se presenta en la Figura 4.46.

Para el caso de intersecciones no semaforizadas, se pueden realizar tres análisis: el análisis de intersecciones donde dos accesos se encuentran controlados por señales de pare, el análisis de intersecciones donde to-

SATURATION FLOW/ADJUSTMENT			
Eastbound		Westbound	
Northbound		Southbound	
Ideal Saturation Flow Rate (pc/h/gt)			
Lane Width (ft)		Percent Heavy Vehicles (%)	
Percent Grade (%)		Parking Maneuvers per hour	
Bus Stops per hour		Highest Single Lane Volume in Lane Group (vph)	
Conflicting Bikes and Pedestrians per hour		Percent Turns Using Protected Phase	
Adjustment Factors		Adjusted Saturation Flow Rate (vph/gt)	

Figura 4.44
Ajuste de flujo de saturación de intersecciones semaforizadas

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

dos los accesos se encuentran controlados por pare y el análisis de intersecciones giratorias (glorietas).

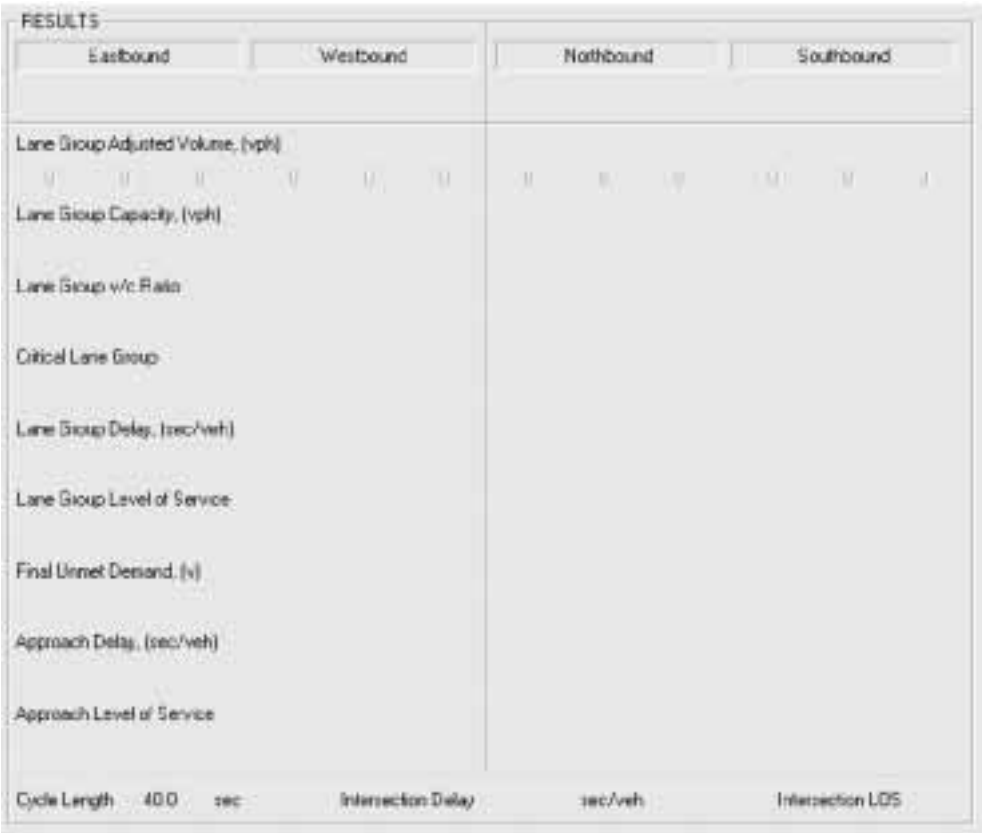
4.1.11.1 Descripción de las secciones de análisis de intersecciones no semaforizadas

Como información general se debe ingresar la información de interés del proyecto que se está analizando: nombre del profesio-

nal que lo ejecuta, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombres de las vías presentadas en dirección Norte-Sur y Sur-Norte, así como los nombres de las vías presentadas en sentido Oriente-Occidente y Occidente-Oriente.

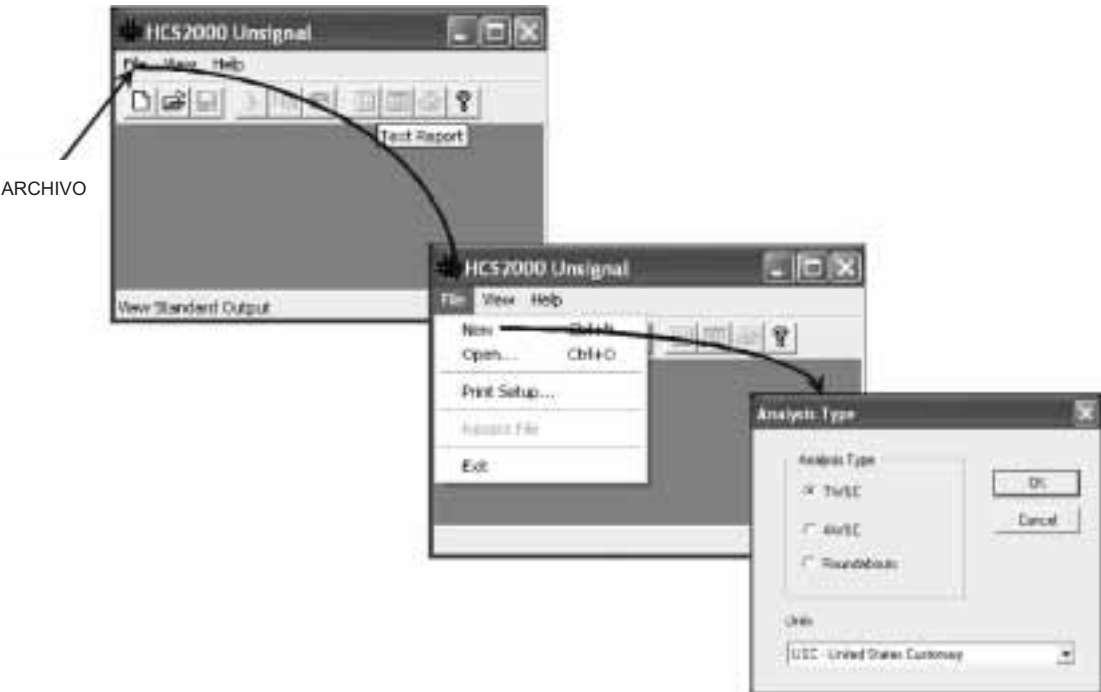
Se presenta a continuación la descripción de las principales secciones consideradas en el análisis de intersecciones no semaforizadas, de acuerdo a lo presentado en la Figura 4.47.

Figura 4.45
Resultados del análisis de intersecciones semaforizadas



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Figura 4.46
Buscando
módulo de
análisis de
intersecciones
no
semaforizadas



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e



Figura 4.47
Módulo de análisis de intersecciones no semaforizadas

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Entrada de datos geométricos, volúmenes y ajustes

Se relaciona la información de volúmenes de tránsito de interés a la intersección, acorde con los accesos presentados en la intersección y del proyecto en estudio. La información que se contempla incluye la definición de la vía de mayor importancia en la intersección, el número de carriles presentados para los movimientos registrados (izquierda, directo o derecha). Se especifica de igual forma si los carriles son compartidos o si el carril de giro a la derecha se encuentra canalizado. Así mismo, se define el efecto de las aproximaciones a intersecciones que permitan acomodar un mayor número de vehículos en cola y se establece el tipo de división presentada entre los sentidos de circulación. Con respecto a la información de los volúmenes de tránsito, se relaciona el volumen horario pico, el factor de hora pico por

movimiento y se tiene en cuenta la composición de vehículos pesados y la pendiente presentada en el acceso. En la Figura 4.48 se presenta el detalle de entrada de datos geométricos y de volúmenes.

Ajuste de brechas críticas y tiempos de seguimiento

En este módulo se debe relacionar la información correspondiente a los tiempos de brecha crítica (menor intervalo de tiempo en la vía de mayor importancia dentro de la intersección que permite la entrada de un vehículo de la vía de menor importancia). Es de resaltar que un conductor podrá aceptar brechas menores de la crítica o mayores o iguales a ésta. La brecha crítica puede estimarse con base en observaciones de las brechas largas y bajas aceptadas en una intersección.

Figura 4.48

Entrada de
datos
geométricos,
volúmenes y
ajustes de
análisis

Fuente:

Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

El tiempo de seguimiento es el lapso transcurrido entre la salida de un vehículo y el paso del siguiente, presentado en la vía de menor importancia al considerar la brecha de la vía de mayor importancia, es decir, que el tiempo de seguimiento define el flujo de saturación del acceso. Para determinar el intervalo de tiempo de brecha crítica en las vías de importancia, se deben considerar los factores de ajuste por presencia de vehículos pesados, la proporción de vehículos pesados en el movimiento secundario, los factores de ajuste por pendiente y por la geometría de la

intersección. En la Figura 4.49 se presenta el detalle de ajuste de brechas críticas y tiempos de seguimiento.

Volúmenes peatonales

En esta entrada se incluye la información correspondiente a los volúmenes de peatones por hora presentados en los accesos evaluados. Se debe incluir la información del ancho de carril y la velocidad promedio de los peatones para determinar el porcentaje de bloqueo en el acceso. En la Figura 4.50 se

Major Street						Minor Street					
Eastbound			Westbound			Northbound			Southbound		
Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	Left	Thru	Right	Left	Thru	Right
Base Critical Gap (sec)						Base Critical Gap (sec)					
[1.1] [] []			[1.1] [] []			[1.1] [] []			[1.1] [] []		
Critical Gap (sec)						Critical Gap (sec)					
[1.1] [] []			[1.1] [] []			[1.1] [] []			[1.1] [] []		
Two Stage Critical Gap (sec)						Two Stage Critical Gap (sec)					
[1.1] [] []			[1.1] [] []			[1.1] [] []			[1.1] [] []		
Base Follow-up Time (sec)						Base Follow-up Time (sec)					
[2.0] [] []			[2.0] [] []			[2.0] [] []			[2.0] [] []		
Follow-up Time (sec)						Follow-up Time (sec)					
[2.0] [] []			[2.0] [] []			[2.0] [] []			[2.0] [] []		

Figura 4.49
Ajuste de brechas críticas y tiempos de seguimiento

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

presenta el detalle de entrada de volúmenes peatonales.

Intersecciones semaforizadas corriente arriba

Se presentan los resultados de los efectos de intersecciones corriente arriba para modelar la habilidad de representar la interacción entre el proceso de aceptación de brechas, la dispersión de pelotones y los sistemas de control de la intersección. La información requerida incluye la existencia de intersecciones corriente arriba de los accesos estudiados, la distancia existente a dicha in-

tersección, la velocidad de progresión, la longitud del ciclo, el volumen de progresión de la intersección, el flujo de saturación, el tipo de arribo y el tiempo de verde efectivo para el mencionado acceso. En la Figura 4.51 se presenta el detalle de datos de intersecciones semaforizadas corriente arriba para el análisis de intersecciones no semaforizadas.

Resultados

Se presentan los principales resultados del análisis de los accesos de intersecciones no semaforizadas que incluyen el volumen de tránsito ajustado, la capacidad del movi-

PEDESTRIAN VOLUMES AND ADJUSTMENTS			
Flow (ped/hr)	[0] [] []	[0] [] []	[0] [] []
Lane Width (ft)	[12.0] [] []	[12.0] [] []	[12.0] [] []
Walking Speed (ft/sec)	[4.0] [] []	[4.0] [] []	[4.0] [] []
Percent Blockage	[0] [] []	[0] [] []	[0] [] []

Figura 4.50
Entrada de volúmenes peatonales del análisis de intersecciones no semaforizadas

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Figura 4.51
Datos de
intersecciones
semaforizadas
corrientes

UPSTREAM SIGNAL DATA							
Eastbound		Westbound		Northbound		Southbound	
Existing? ☐ Yes ☐ No							
Distance to Signal (ft)							
Progression Speed (mph)							
Cycle Length (sec)							
Left	Thru	Left	Thru	Left	Thru	Left	Thru
Progressed Volume (vph)							
Saturation Flow Rate per Lane (vph)							
Arrival Type							
Effective Green Time, g (sec)							

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Figura 4.52
Resultados del
análisis de
intersecciones
no
semaforizadas

RESULTS					
Major Street			Minor Street		
Eastbound		Westbound	Northbound		Southbound
Left	Thru	Right	Left	Thru	Right
Volume (vph)					
Minimum Capacity					
Shared Lane Capacity					
Minimum v/c Ratio					
95% Queue Length					
Control Delay (sec/vch)					
Minimum Level of Service					
Approach Delay (sec/vch)					
Approach Level of Service					

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

miento, la capacidad del carril compartido, la relación volumen/capacidad, la longitud de cola, la demora debida al control del acceso, el nivel de servicio del acceso, la demora y el nivel de servicio del acceso. En la Figura 4.52 se presenta el detalle de los resultados de los análisis de intersecciones no semaforizadas.

4.1.12 Módulo de análisis de arterias urbanas

El módulo de análisis de intersecciones urbanas está relacionado con el análisis de

corrientes de características de flujo discontinuo. El menú de análisis de arterias urbanas se presenta en la Figura 4.53.

4.1.12.1 Descripción de las secciones de análisis de arterias urbanas

Como información general se relaciona la información de interés del proyecto que se está analizando: nombre del profesional que ejecuta el análisis, empresa, fecha, período de análisis, descripción del proyecto, nombres de la arteria urbana en la cual se realiza el proyecto y su dirección de viaje.

Se presenta a continuación la descripción de las principales secciones consideradas en el análisis de arterias urbanas, de acuerdo con lo presentado en la Figura 4.54.

Características del tránsito

Se relaciona la información de las características de los volúmenes de tránsito

de interés a la arteria en evaluación. La información que se contempla incluye la definición del volumen promedio diario anual, el factor de análisis de planeamiento, el factor de distribución direccional del tránsito, el factor de hora pico, el flujo de saturación (el volumen de tránsito por hora por verde por carril) y el porcentaje de giros desde carriles exclusivos. En la Figura 4.55 se presenta el detalle de información de características del tránsito.

Características de la vía

Se debe relacionar la información correspondiente al número de carriles presentados en la dirección de análisis, el tipo de arteria urbana, la presencia de separador en la vía, la velocidad y longitud del segmento de análisis, así como la presencia de bahías de giro a la izquierda. En la Figura 4.56, se presenta el detalle del módulo de ajuste de características de la vía.



Figura 4.53
Buscado
módulo de
entrada de
arterias
urbanas

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Figura 4.54
Módulo de
análisis de
arterias
urbanas

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa HCS
2000 Versión 4.1e

Características de dispositivos de control

Se incluye la información correspondiente a las características de los dispositivos de control presentados en la arteria de análisis. La información que se relaciona para el análisis considera la cantidad de intersecciones semaforizadas, el tipo de arribo, el tipo de dispositivo (prefijado o actuado), la longitud del ciclo de los semá-

foros y la relación verde/longitud de ciclo. En la Figura 4.57 se presenta el detalle de las características de los dispositivos de control.

Resultados

Se presentan los principales resultados del análisis de la arteria urbana, que incluyen el volumen de tránsito ajustado, el volumen de tránsito presentado en 15 minutos, el

Figura 4.55
Información de
características del
tránsito de análisis
de arterias urbanas
Fuente: Elaboración
propia con base en el
programa HCS 2000

Figura 4.56
Ajuste de características de la arteria urbana

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Figura 4.57
Características de dispositivos de control de arterias urbanas

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

Results			
Annual Average Daily Traffic	0 vpd	Running Time	0.0 sec
Two-Way Hourly Volume	vph	Control Delay	sec/v
Hourly Directional Volume	vph	Average Travel Speed	km/h
Through-Volume 15-min Flow Rate	v	Urban Street LOS	

Figura 4.58
Resultados del análisis de arterias urbanas

Fuente: Elaboración propia con base en el programa HCS 2000 Versión 4.1e

tiempo de viaje del segmento, las demoras presentadas por los dispositivos de control, la velocidad promedio de viaje y el nivel de servicio. En la Figura 4.58 se presenta el detalle del módulo de resultados de los análisis de arterias urbanas.

4.2 SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN Y LA OPTIMIZACIÓN

Esta categoría de aplicaciones de software se basa en modelos de tránsito que permiten realizar evaluaciones más detalladas de la corriente del tránsito y la infraestructura debido a que involucran características más detalladas de la infraestructura (oferta) y de los diversos usuarios (demanda). En consecuencia, permiten realizar evaluaciones de diversos escenarios

de análisis que pueden involucrar procesos de optimización. Las principales herramientas aplicables en la ingeniería de tránsito, para este nivel, se relacionan a continuación.

- ♦ SIDRA
- ♦ TRANSYT7F
- ♦ SYNCHRO
- ♦ LISA+

4.2.1 Signalised & Unsignalised Intersection Design and Research Aid (SIDRA)

4.2.1.1 Descripción

El SIDRA (aaSIDRA 2.0) es un modelo utilizado para la evaluación, diseño y optimización de los siguientes tipos de intersecciones:

- ◆ Intersecciones semaforizadas (tiempo prefijado o actuado)
- ◆ Glorietas
- ◆ Intersecciones con la presencia de señales de pare en dos vías
- ◆ Intersecciones con la presencia de señales de pare en todas las vías
- ◆ Intersecciones con la presencia de señales de ceda el paso

4.2.1.2 Alcances

El SIDRA usa modelos de tránsito analíticos detallados con un método de aproximación iterativo que permite estimar la capacidad y estadísticas de funcionamiento (demoras longitud de cola, tasa de paradas, etc.) de intersecciones. Los modelos de tránsito del SIDRA pueden ser calibrados para condiciones locales.

4.2.1.3 Beneficios y utilidades

El SIDRA es una herramienta informática que permite realizar diferentes análisis en diferentes categorías. Mediante el SIDRA se puede:

- ◆ Estimar capacidad y características de funcionamiento, como demoras, longitud de colas, tasa de paradas, costos de operación, consumo de combustibles, emisión de gases para todo tipo de intersecciones.
- ◆ Comparar diversas alternativas de diseño para optimizar la geometría de la intersección, fases semafóricas y tiempos de las diferentes estrategias de optimización.
- ◆ Modelar intersecciones de hasta ocho accesos. Cada uno de los accesos puede considerar vías de un solo carril o vías de múltiples carriles, reducciones de carri-

les y carriles de giros exclusivos a izquierda y derecha.

- ◆ Determinar los tiempos de las fases semafóricas para cualquier geometría de intersección considerando operaciones prefijadas o actuadas de los semáforos.
- ◆ Examinar la vida del proyecto, analizando el impacto en el crecimiento del tránsito; realizar análisis de sensibilidad de parámetros para optimizar con propósitos de evaluación y diseño.
- ◆ Analizar el efecto de la presencia de vehículos pesados en el funcionamiento de la intersección y contemplar casos de carriles compartidos.
- ◆ Preparar datos e inspección de salidas gráficamente y obtener reportes de resultados para carriles individuales, movimientos individuales, movimientos en grupos de las intersecciones.
- ◆ Presentar resultados por medio de imágenes o figuras.
- ◆ Calcular estadísticas de costo de operación, consumo de combustibles, emisiones, demoras y beneficios sobre los tratamientos de la intersección.
- ◆ Calibrar parámetros de modelos de costo operacional para condiciones locales teniendo en cuenta factores como el valor del tiempo y el consumo de combustible.

4.2.1.4 Componentes del SIDRA

El modelo SIDRA cuenta con dos programas de apoyo principales.

- ◆ SIDRA, que es el administrador principal del programa y de los archivos de procesamiento computacional y de rutinas de salidas gráficas.
- ◆ RIDES (Road Intersection Data Editing System), que comprende el módulo de

entrada de datos necesarios para ejecutar los análisis de los diferentes tipos de intersecciones.

El SIDRA funciona en la plataforma Windows y opera con menús para el acceso a los diferentes módulos.

4.2.1.5 Operación del Programa SIDRA

En esta sección se describen las características fundamentales del programa SIDRA (Versión aaSIDRA 2.0). Este software presenta los diversos programas de apoyo visualizados por el usuario a través del uso de menús, como se presenta a continuación:

El menú principal del programa se presenta en la Figura 4.59.

La opción ofrecida inicialmente por el SIDRA permite consultar los archivos analizados previamente con el modelo, como se puede observar en la Figura 4.59. Esto permite al usuario acceder en forma inmediata a los

modelos analizados anteriormente o buscar un modelo previo.

Para iniciar un análisis nuevo con el modelo SIDRA, el usuario debe acceder al menú ARCHIVO (FILE en inglés), ubicado en la barra de herramientas y escoger la opción NEW. Entonces, se presenta al usuario la opción de escoger un análisis específico, como se observa en la Figura 4.60.

Una vez desplegado el menú de opciones de análisis presentado en la Figura 4.60, el usuario debe elegir solamente una opción de análisis de intersección:

- ◆ Intersección semaforizada a nivel
- ◆ Cruce peatonal
- ◆ Glorietas
- ◆ Intersecciones con la presencia de señales de pare en dos vías
- ◆ Intersecciones con la presencia de señales de pare en todas las vías
- ◆ Intersecciones con la presencia de señales de ceda el paso

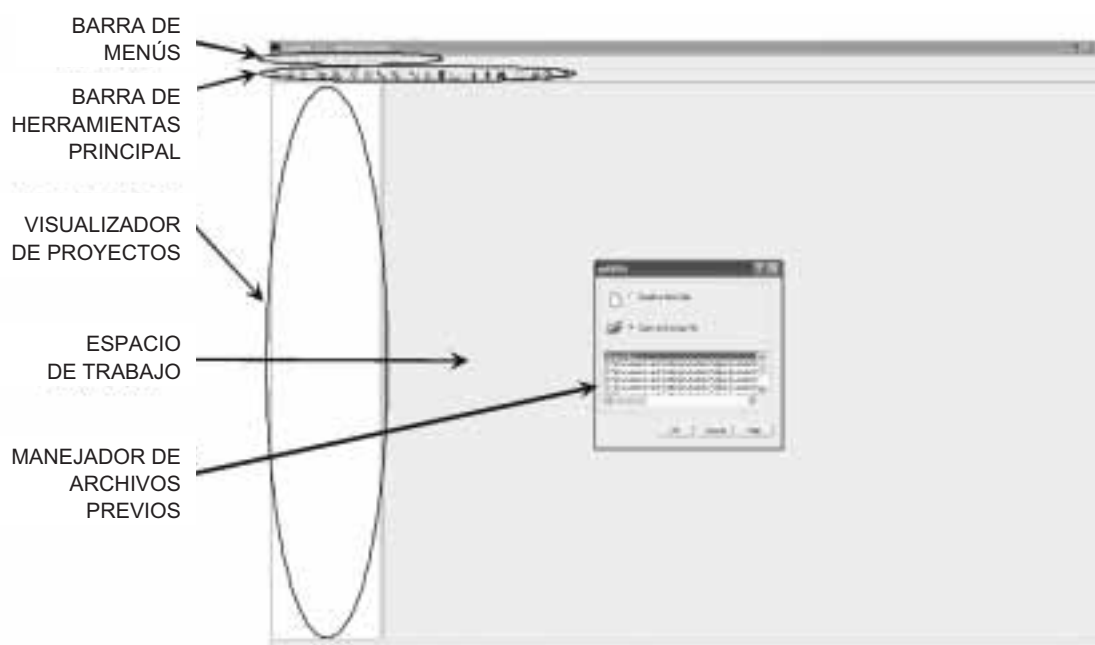


Figura 4.59
Menú principal
del Programa
SIDRA

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa aaSIDRA
Versión 2.0

Además, se debe seleccionar el tipo de control (prefijado o actuado) y la dirección de la vía de mayor importancia (utilizado para el análisis de cruces peatonales, intersecciones con señales de pare en dos de los accesos presentados y en las intersecciones con señales de ceda el paso).

La Tabla 4.3 resume las posibilidades de la barra de menús y submenús de los módulos específicos del SIDRA.

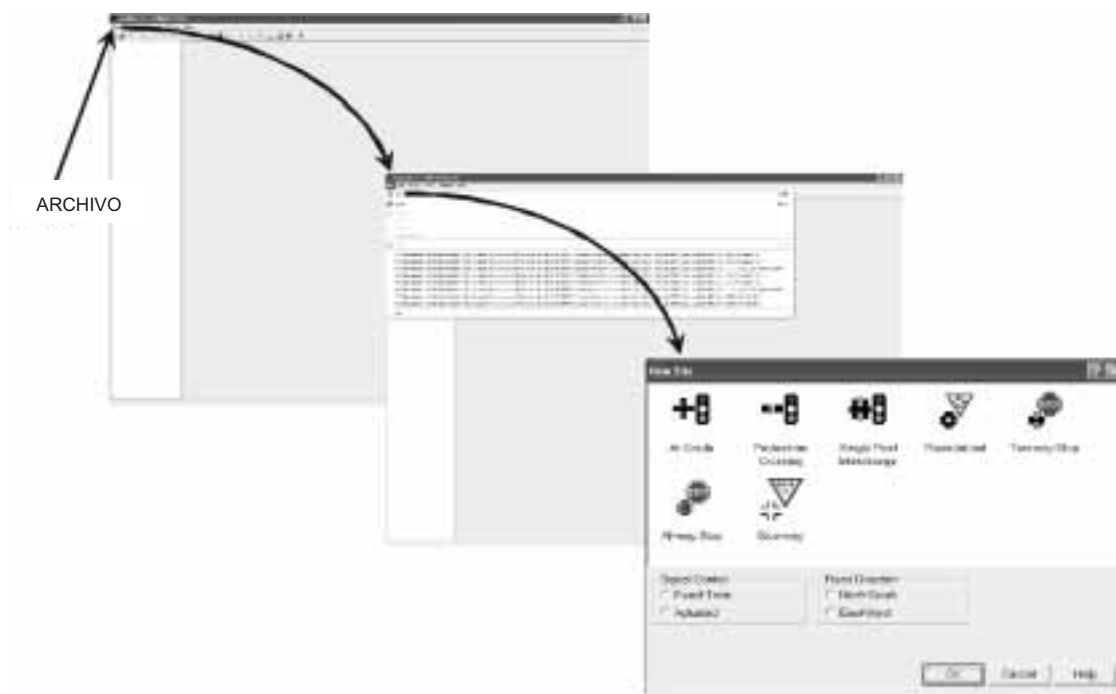
La barra de herramientas principal del SIDRA permite acceder rápidamente a diversas funciones que se pueden realizar desde la barra de menús. Las acciones que se pueden realizar a través de la barra incluyen crear un nuevo proyecto, abrir un proyecto existente, guardar como. También existen funciones de edición, como copiado e impresión. Se puede igualmente ejecutar el procesamiento del análisis, realizar cambios en la configuración

del modelo, definir los parámetros de costo, análisis de sensibilidad. Finalmente se presentan herramientas de visualización y de ayuda del modelo. En la Figura 4.61 se presentan las principales funciones de la barra de herramientas principal del programa.

Una vez definidas las características a considerar en la entrada de datos y realizado la entrada de los mismos utilizando el módulo específico RIDES, se ejecuta el procesamiento del análisis mediante los menús disponibles para llevar a cabo la acción de procesamiento. En la Figura 4.62 se presenta el manejador del SIDRA, en el cual se identifica, en el visualizador de proyectos, la información de entrada disponible (INPUT) para el análisis que se está realizando.

Una vez el administrador del SIDRA presenta los datos de entrada disponibles, se procede a realizar el procesamiento de la in-

Figura 4.60
Configuración
inicial del
módulo de
análisis de
intersecciones



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa aaSIDRA
Versión 2.0

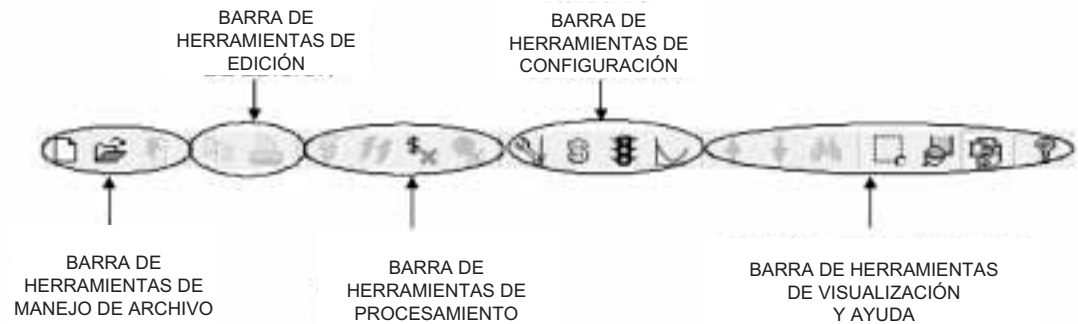
Menú principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo proyecto e inicialización de un nuevo archivo.
	Open	Abrir un archivo existente.
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando un nombre específico nuevo.
	Close	Cerrar el archivo existente.
	Close All	Cierra todos los archivos que se encuentren abiertos actualmente.
	Delete Site Files	Borra los archivos seleccionados en la ventana actual, incluyendo del disco duro.
	Print	Imprime el contenido del documento activo en la impresora.
	Recent Files List	Lista de los últimos ocho archivos que fueron abiertos o grabados.
Edit	Exit	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del SIDRA.
	Copy	Copiado de datos seleccionados en el bloc de notas.
	Cut	Borrado de los datos y almacenamiento en el bloc de notas.
	Delete	Borra la selección actual.
	Paste	Pegado de datos del bloc de notas en el documento activo o localización específica.
	Select All	Selecciona todos los elementos de la ventana activa.
	Find Text	Permite encontrar un texto u objeto en la ventana activa.
Project	Process	Se realiza el procesamiento del modelo de tránsito activo.
	Process Project	Se realiza el procesamiento de los modelos activos en el SIDRA.
	Annual Sums	Transfiere los análisis de SIDRA de los proyectos abiertos en archivos Excel.
	Compare Roundabout Models	Transfiere los datos de análisis de glorietas en una hoja especial de Excel.
Tools	Configuration	Permite hacer cambios en los parámetros de configuración.
	Cost Parameters	Se establecen los parámetros utilizados en los cálculos de costos.
	Actuated Signal Defaults	Se establecen los parámetros utilizados en los cálculos de dispositivos semafóricos actuados.
	Sensitivity Parameters	Se establecen los parámetros utilizados para realizar análisis de sensibilidad.
	Options	Se establecen las opciones de colores para las salidas gráficas.
Window	Arrange	Permite organizar las ventanas activas.
	Cascade	Permite desplegar todas las ventanas activas con la barra de título visible.
	Close	Cierra la ventana seleccionada.
	Minimize All	Minimiza la ventana seleccionada.
	Tile Horizontally	Permite desplegar las ventanas activas en divisiones horizontales.
	Tile Vertically	Permite desplegar las ventanas activas en divisiones verticales.
Help	aaSIDRA Help	Muestra la ayuda en línea disponible para el SIDRA
	aaSIDRA Website	Dirige al usuario a la página WEB del modelo SIDRA
	Akcelik and Associates	Dirige al usuario a la página WEB de Akcelik & Associates
	Request Registration Details	Permite solicitar una clave de registro de usuario del modelo SIDRA
	About	Muestra la información del producto

Tabla 4.3
Barra de
menús y
submenús

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa aaSIDRA
Versión 2.0

Figura 4.61
Barra de
herramientas
principal

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa aaSIDRA
Versión 2.0



formación disponible en el RIDES. Procesada la información de entrada, se producen las diferentes salidas del análisis de la intersección que se estudia y dentro de los resultados, se distinguen las salidas gráficas y las tablas de salida que se visualizan en el espacio de trabajo del manejador del SIDRA, como se presenta en la Figura 4.63.

4.2.1.6 Operación del Programa RIDES

El SIDRA permite la entrada de datos interactiva para el análisis de intersecciones mediante el RIDES (Road Intersection Data Editing System). La configuración inicial del RIDES se presenta en detalle en la Figura 4.64. Al módulo RIDES se accede en forma automática al iniciar un nuevo análisis. Para

análisis previos, se puede acceder al programa para cada intersección, desde el visualizador de proyectos, al hacer clic sobre el módulo RIDES listado en el mencionado visualizador.

Como se puede observar en la figura 4.6.3, el RIDES permite ejecutar diversas funciones de entrada de datos a partir de la barra de menús. Las principales funciones que se pueden realizar desde el RIDES se presentan en la Tabla 4.4.

Los menús de opción de edición (Edit) y de información adicional (Extra Data) permiten la entrada de datos ordenados desde los aspectos generales del análisis hasta los datos detallados, es decir, se parte de las características macro de la intersección de análisis hasta llegar a aspectos detallados de carriles y de los movimientos presentados.

Figura 4.62
Entrada de
datos
finalizada en el
Programa
SIDRA

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa aaSIDRA
Versión 2.0



4.2.2 Traffic Network Study Tool (TRANSYT-7F)

4.2.2.1 Descripción

El principal uso de la herramienta informática TRANSYT-7F es diseñar y optimizar la sincronización de los

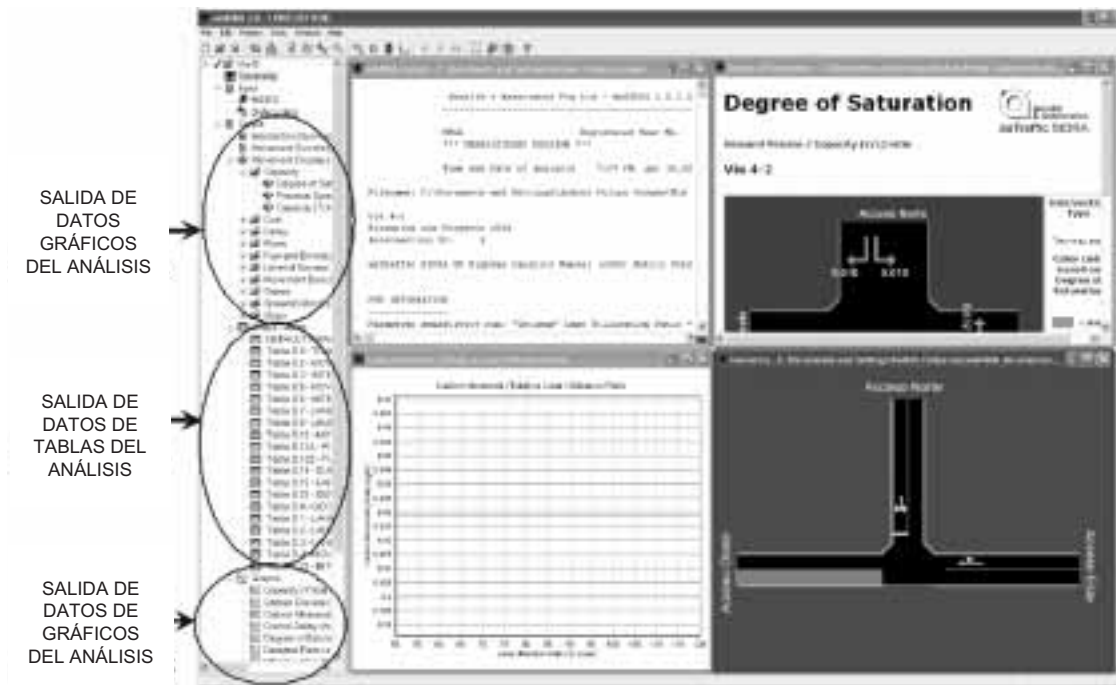


Figura 4.63
Salida de datos del análisis realizado

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa aaSIDRA Versión 2.0

dispositivos semafóricos presentados en una red vial urbana.

El software TRANSYT-7F permite al analista optimizar los dispositivos semafó-

ricos mediante el algoritmo genético (buscando encontrar la solución óptima de la longitud del ciclo, análisis de la secuencia de las fases de semáforos, posición de fases



Figura 4.64
Configuración inicial del módulo rides

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa aaSIDRA Versión 2.0

Tabla 4.4
Barra de
menús y
submenús del
Modelo Rides

Menú principal	Submenú	Función
Edit	Basic Parameter	Definición del título del proyecto, período de tiempo considerado y otra información adicional.
	Intersection	Definición de la geometría de la intersección a analizar y datos básicos de la intersección en forma global.
	Rondabout Data	Información sobre la intersección tipo glorieta.
	Approaches	Información específica para cada acceso presentado en la intersección.
	Lanes	Información específica para cada carril de cada acceso presentado en la intersección, consideración de carriles exclusivos y compartidos.
	Volumes	Información sobre los volúmenes vehiculares presentados por movimiento en la intersección y de peatones.
	Phasing/Priorities	Descripción de las fases presentadas en la intersección y de las prioridades de la intersección. Se define la secuencia de las mismas dentro del funcionamiento de la intersección.
	Opposed Turns	Definición de los movimientos opuestos para cada acceso y los códigos de los movimientos.
	Cycle Time (variable)	Información sobre la variabilidad de los ciclos semafóricos de la intersección.
Extra Data	Flow Scale (variable)	Información sobre la variabilidad de los volúmenes de la intersección.
	Movement Description	Descripción de los movimientos por carril.
	Timing Data	Información sobre los períodos del semáforo (primero y segundo período de verde).
	Phase Times	Tiempos de cambio de fase.
	Green Split Priority	Información del tiempo de verde de desfase.
	Geometric Delay Data	Información de datos geométricos computables en la demora.
	Movement Data (1)	Información de velocidades, distancia, espaciamiento de colas, control y tipo de arribos.
	Movement Data (2)	Información de tipos de giros, pendientes, grado de saturación práctica, flujos de saturación.
	Define Mov. Grouping	Descripción del grupo de carriles o movimientos de carriles.
Help	Data for Mov. Groupings	Datos para el grupo de carriles o movimientos de carriles.
	Help System	Muestra la ayuda en línea disponible para el RIDES.
	Keys	Muestra la ayuda en línea disponible para el teclado utilizado en el RIDES.
	Help Index	Muestra el índice de la ayuda en línea disponible para el RIDES.
Save	Program Info	Información del programa.
		Graba la información ingresada en el RIDES.
Exit		Permite al usuario salir del RIDES.

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa aaSIDRA
Versión 2.0

y los desfases). TRANSYT-7F es el único paquete de software disponible que combina el estado del arte en procesos de optimización (compuesto por el algoritmo genético, en multiperíodos, y la optimización del modelo CORSIM-Corridor Simulation) con un modelo avanzado de la simulación del tránsito macroscópico (que incluye el desbordamiento de colas atrás, la dispersión del pelotón y la simulación actuada de semáforos).

Entre las características principales del modelo macroscópico del tránsito que se ejecuta en el TRANSYT-7F están la simulación detallada de la dispersión del pelotón, la devolución y desbordamiento de colas, el control de tránsito actuado y la flexibilidad para realizar análisis carril por carril. Además, mientras que otros modelos y aplicaciones de software se limitan a analizar 4 o 5 accesos de intersecciones, en este software no hay limitación práctica al número de los accesos que se pueden simular por TRANSYT-7F. El sentido explícito de conducir por los lados derechos e izquierdos, así como el uso de unidades inglesas y métricas, permite que TRANSYT-7F sea utilizado por todo el mundo.

Las características del proceso de optimización de TRANSYT-7F incluyen la disponibilidad de técnicas múltiples de búsqueda (análisis de gradiente y un algoritmo genético), numerosas funciones objetivas de optimización (involucrando combinaciones de las oportunidades de la progresión, demoras, paradas, consumo de combustibles, rendimientos y formación de colas), con amplia capacidad de modificar el proceso de la optimización para requisitos particulares y de optimizar los ajustes de los semáforos (longitud del ciclo, secuencia de fases, posiciones, repartos y compensaciones).

4.2.2.2 Alcances

La versión actual de TRANSYT-7F está dimensionada para acomodar un máximo de 99 intersecciones por archivo de datos, que excede ampliamente el número de las intersecciones semaforizadas que se pueden coordinar prácticamente y con eficacia. Aunque muchas ciudades contienen más de 99 intersecciones coordinadas, éstas se deben subdividir típicamente en áreas de coordinación mucho más pequeñas, con grupos pequeños (o “racimos”). El software puede analizar un máximo de 7 fases de señales por intersección, suficiente para modelar virtualmente cualquier plan prefijado del tiempo o control de tránsito actuado.

TRANSYT-7F permite al usuario elegir entre dos tipos de la simulación: de enlace a enlace y por etapas. Antes de discutir estos tipos de simulación, es importante entender los significados de los términos “enlace” y “movimiento”.

En el TRANSYT-7F, un movimiento se identifica por su dirección de giro sin importar el número de carriles y sin importar si los carriles están compartidos o son exclusivos. Por ejemplo, un movimiento de giro a la izquierda puede incluir todos los vehículos que dan vuelta a la izquierda desde un carril de giro a la izquierda exclusivo, más cualquier vehículo que da vuelta a la izquierda desde un carril de giro a la izquierda compartido adyacente. Esto se referirá a menudo a los tres movimientos de giro a la izquierda, a la derecha y directo en un acceso de una intersección.

Internamente, dentro de su proceso de simulación, TRANSYT-7F se refiere sobre todo a enlaces. Un enlace es una entidad flexible que el usuario puede definir de diversas maneras para tener en cuenta la mejor eficacia y exactitud para modelar. Por ejemplo,

un solo enlace se podría definir para representar los tres movimientos en un solo acceso de una intersección. Alternativamente, se podrían definir tres enlaces, dando por resultado un enlace para representar cada movimiento. Finalmente, en el caso de un movimiento que da vuelta desde múltiples carriles, es incluso posible definir accesos múltiples para representar cuidadosamente cada carril individual dentro del modelo.

La simulación de enlace a enlace es el proceso disponible en versiones de TRANSYT-7F previas. En este tipo, cada acceso individual se simula completamente antes de realizar la simulación del enlace siguiente. Los enlaces se procesan en un orden específico, es decir, se empieza corriente arriba a corriente abajo según la propagación que esté definida. El “árbol de enlaces” también toma en cuenta lazos alrededor de bloques.

Aunque la simulación de enlace a enlace es computacionalmente eficiente y se considera aceptable en condiciones sobresaturadas, no es conveniente en las condiciones congestionadas, porque los efectos del derramamiento y desbordamiento de la cola no se pueden considerar en este proceso de la simulación.

Además, en la simulación de enlace a enlace, se asume sólo que los vehículos arriban a la línea de parada, y no a la parte posterior de la cola, como ocurre en realidad. Este supuesto no tiene en cuenta los tiempos del recorrido requeridos entre los vehículos que se encuentran en cola y la línea de la parada. También la cola se asume “para ser apilada” verticalmente en la línea de la parada. Esto significa que los vehículos están acumulados en la cola en un acceso sin considerar la longitud de la misma. Así, la simulación puede producir una longitud de la cola posterior que excede real-

mente la longitud de almacenamiento de la cola del acceso. TRANSYT divulga el máximo de longitud posterior de la cola, destacándose que el cálculo de la simulación enlace por enlace es menos realista. A pesar de estas deficiencias, este enfoque de simulación se puede utilizar razonablemente en condiciones sobresaturadas. Su ventaja principal, según lo observado antes, es su eficiencia en cuanto al tiempo de procesamiento del computador.

La simulación por etapas o pasos fue introducida inicialmente en el lanzamiento de la versión 8 del TRANSYT-7F. En este tipo, todos los accesos se simulan para el primer tiempo de paso (típicamente un segundo) antes de realizar la próxima simulación y el próximo paso. Los accesos se procesan en orden específico de modo que la propagación sea de corriente abajo a corriente arriba (opuesto a la secuencia de la simulación enlace a enlace). Este proceso de simulación permite:

- ♦ Modelar explícitamente condiciones saturadas, incluidos los efectos del derramamiento de colas.
- ♦ Efectuar un cálculo más exacto de la parte posterior de la cola.
- ♦ Llegadas de vehículo en la parte posterior de la cola.
- ♦ Modelar explícitamente múltiples (una secuencia de) ciclos y de períodos múltiples.
- ♦ Permitir diferentes longitudes de ciclos en las intersecciones (para operaciones no coordinadas).

La simulación por pasos o etapas es menos eficiente computacionalmente que la simulación enlace a enlace, y requiere mayores tiempos de procesamiento del programa en el computador.

4.2.2.3 Beneficios y utilidades

Además de intersecciones semaforizadas, TRANSYT-7F puede simular explícitamente las intersecciones controladas por señales de pare de dos vías (TWSC) y las intersecciones controladas por señales de ceda el paso. Las intersecciones y los cruces giratorios controlados por todos los accesos (AWSC) se pueden modelar implícitamente con sus efectos sobre la dispersión del pelotón en intersecciones señalizadas, pero las medidas de eficacia (MOE) para estas intersecciones no se estiman ni se proporcionan.

El TRANSYT-7F es un modelo que permite realizar la simulación del flujo del tránsito en una red semaforizada. La simulación es un proceso analítico que busca representar acontecimientos reales; en este caso, el tránsito atraviesa la red, siendo detenido en las intersecciones por la señal roja. Después de este evento, se halla en movimiento cuando la señal está en verde. El modelo de simulación del tránsito en TRANSYT-7F (también llamado “modelo del tránsito”) está entre las más realistas de los disponibles en la familia de los modelos macroscópicos automatizados del tránsito.

El modelo macroscópico del TRANSYT da prioridad a los pelotones de vehículos sobre los vehículos individuales. TRANSYT simula la circulación en incrementos pequeños de tiempo; en consecuencia, su representación del tránsito es más detallada que otros modelos macroscópicos que asumen distribuciones uniformes dentro de los pelotones del tránsito. El modelo del tránsito más reciente utiliza un algoritmo de la dispersión del pelotón que simula la dispersión normal (es decir, “separación”) de pelotones mientras viajan corriente abajo. También considera las demoras del tránsito, las paradas, el

consumo de combustible, el tiempo de recorrido y otras medidas del sistema.

TRANSYT-7F simula la circulación del tránsito a nivel macroscópico, pero por etapas. La longitud del ciclo se divide en incrementos pequeños, de tiempo iguales, llamados pasos o etapas. Un paso es un período entre uno y tres segundos, aunque la relación entre los segundos y los pasos no necesita ser una conversión del número entero. La simulación por etapas fue diseñada sobre todo para asumir que un paso es igual a un segundo. La duración de un paso, sin embargo, será la resolución más fina a la cual se puede representar la sincronización de la señal en el modelo de simulación. Cuanto más pequeño sea el tamaño del paso o etapa y cuanto más fina es la resolución, serán más exactos los resultados. La desventaja de los tamaños de pasos pequeños es que aumentan los tiempos en marcha del programa en el computador.

4.2.2.4 Componentes del TRANSYT-7F

El TRANSYT-7F cuenta con tres programas de apoyo principales, así:

- ◆ Programa Principal. Interfaz gráfica del software en Windows, soporta la ejecución de varios programas y es el programa fundamental.
- ◆ MAP. Comprende el módulo en el cual se realiza la edición y la entrada gráfica de datos necesarios para llevar a cabo los análisis respectivos mediante el modelo.
- ◆ RECORD EDITOR. Módulo de apoyo que permite realizar la entrada de datos de acuerdo con los diferentes tipos de fichas de grabación de datos de entrada.

El TRANSYT-7F es un programa que funciona en la plataforma Windows y opera con menús para el acceso a los diferentes módu-

los de apoyo específicos. Así, desde el TRANSYT-7F se puede acceder al MAP y al RECORD TYPE al accionarlos mediante los accesos dispuestos para tal fin.

4.2.2.5 Operación del Programa TRANSYT-7F

En esta sección se describen las características fundamentales del programa TRANSYT-7F (Versión 10.2). El TRANSYT-7F, presenta los diversos modelos de apoyo visualizados por el usuario a través del uso de menús, como se presenta a continuación.

Menú Principal del administrador principal

El menú principal del manejador principal del TRANSYT-7F se presenta en la Figura 4.65.

El manejador principal del TRANSYT-7F permite iniciar un nuevo análisis, al aparecer el menú presentado en la Figura 4.66, donde se observa que el nuevo análisis debe tener en cuenta la definición de parámetros globales, como nombre que se da al archivo de la entrada de datos del análisis, nomenclatura de los movimientos, número de intersecciones, número de rutas, duración del tiempo de ciclo,

tiempo de duración del análisis, número de períodos a evaluar, tipo de unidades, conducción por lado derecho o izquierdo, volumen, factor de hora pico, flujo de saturación, longitud de los enlaces, velocidad a flujo libre, número de fases, tiempo de amarillo, tiempo de todo rojo, longitud de localización de detectores y tiempo de brechas. En la Figura 4.67 se presenta en detalle la información que debe ser considerada para el análisis.

Una vez se definen las características básicas de la red vial para el análisis, se requiere perfeccionar la entrada de datos al utilizar los módulos de apoyo del TRANSYT-7F.

En la Tabla 4.5 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menús y submenús de módulos específicos del administrador principal del TRANSYT-7F.

El funcionamiento del administrador principal del TRANSYT-7F permite acceder a varias características del programa, incluidos la optimización genética del algoritmo, la optimización del gradiente, la optimización de la longitud del ciclo, las pantallas gráficas de salida, el establecimiento de esquemas de enumeración de accesos y la importación de archivos del modelo HCS, CORSIM, entre otros.

Así mismo, permite corregir datos del TRANSYT7F colocando al día el tipo del for-

Figura 4.65
Menú principal
del
TRANSYT-7F



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2



Figura 4.66
Módulo de
análisis del
TRANSYT-7F

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

mato de registro del fichero de datos. La selección del menú de visualización de ventanas en cascada es a menudo útil para organizar visualmente y para corregir las pantallas.

El administrador principal del TRANSYT-7F permite realizar operaciones rápidas de edición, análisis, impresión y ayu-

da, mediante la barra de herramientas presentada en el manejador principal, como se observa en la Figura 4.68

4.2.2.6 Operación del MAP

Para arrancar el editor de entrada de datos gráfico del sistema TRANSYT-7F, se debe

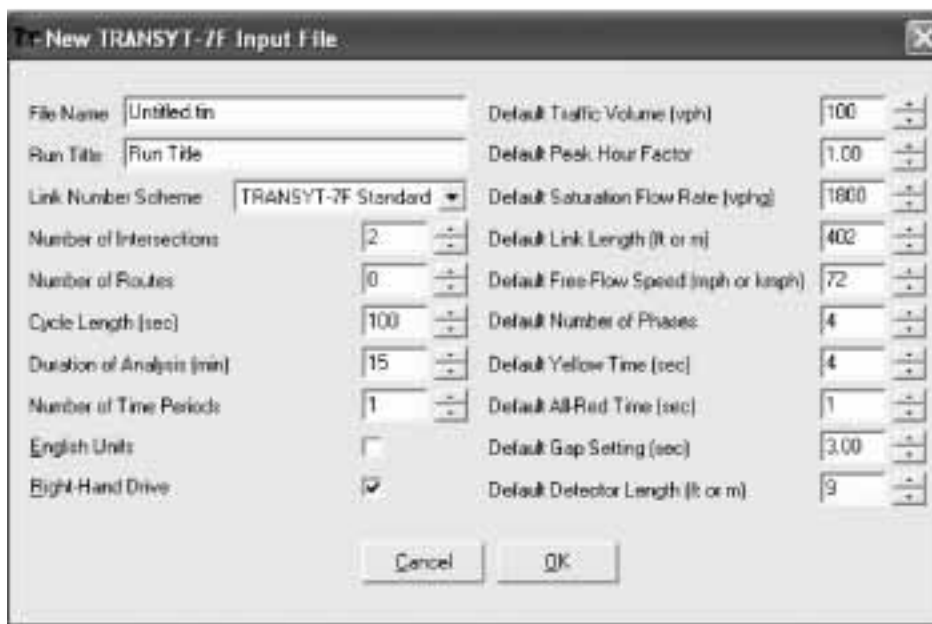


Figura 4.67
Datos de
entrada del
TRANSYT-7F

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

Tabla 4.5
Barra de
menús y
submenús del
manejador
principal del
TRANSYT-7F.

Menú principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo proyecto e inicialización de un nuevo archivo.
	Open	Abrir un archivo existente.
	Save	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Close	Cerrar el archivo existente.
	Text open	Abrir un archivo como archivo de texto a partir de una fila de entrada de datos (*.tin).
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Print	Imprime el contenido del documento activo en la impresora.
	Convert	Permite convertir el análisis microscópico a un análisis macroscópico aplicable al modelo CORSIM.
	Export	Permite la exportación de los tiempos determinados a un archivo del modelo CORSIM.
	Recent files list	Lista de las últimas cuatro filas que fueron abiertas o grabadas.
Edit	Exit	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del TRANSYT-7F.
	Lanes	Se especifica la configuración de datos de carriles para cada intersección.
	Traffic	Se realiza la entrada de datos de volúmenes de tránsito, flujo de saturación, longitud de enlaces, volúmenes a mitad de cuadra, para cada movimiento identificado y para cada intersección.
	Timing	Se realiza la entrada de datos de las fases semafóricas de las intersecciones, considerando tiempos de verde, todo rojo de las diferentes intersecciones.
	Feeders	Se realizan las conexiones de los diferentes enlaces de las diferentes intersecciones.
	Analysis	Se definen las opciones de los análisis que se pueden realizar, como la simulación, optimización, parámetros analizados y método empleado.
View	Optional	Permite la entrada de datos globales, de rutas, fases y tiempos de los semáforos, longitud de almacenamiento de colas, datos de los semáforos prefijados o actuados, pesos específicos de las funciones utilizadas y adición, eliminación e incorporación de nombres de intersecciones.
	Map	Permite la visualización en pantalla de la geometría de la red y de los datos de entrada de la misma.
	Profiles	Permite la visualización gráfica de los resultados del análisis del TRANSYT-7F.
	Record types	Permite la visualización del editor de registros de entrada de datos, permite modificar y editar un archivo de entrada de datos (*.tin).
Run	Progression diagram	Permite la visualización de la progresión entre las intersecciones de la mayor arteria.
	TRANSYT-7F	Realiza el análisis del archivo de entrada de datos mediante el modelo TRANSYT-7F.
	Spyglass	Permite la preparación de la información interna de los análisis, se genera información relacionada con la máxima cola, flujo de saturación, tasa de flujo de entrada, tiempo de viaje.
Window	Tile	Permite la visualización de las ventanas abiertas en divisiones horizontales.
	Cascade	Permite la visualización y organización de las ventanas con la barra visible.
	Arrange	Permite la organización de las ventanas abiertas.

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

Menú principal	Submenú	Función
Options	Data path	Permite establecer la ruta de acceso y guardado de archivos.
	Time period	Se definen los períodos de tiempo considerados para el análisis.
	Preferences	Se establecen aspectos relevantes para los análisis.
	Cruise speed	Se establece la velocidad de cruce (o de marcha).
	Genetic algorithm	Permite establecer opciones de análisis del algoritmo genético.
Help	Help topics	Permite el acceso a las herramientas de ayuda por capítulos, por índice o por búsqueda.
	About T7F10	Presentación de información general, versión del programa, correo electrónico (e-mail) de McTrans y vínculos a páginas del TRANSYT-7F.

Tabla 4.5
(Continuación)
Barra de
menús y
submenús del
manejador
principal del
TRANSYT-7F

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

entrar desde el manejador principal al menú de visualización (VIEW) y ejecutar el submenú del editor de datos gráfico (MAP). En pantalla se visualiza el módulo de entrada de datos gráfico del TRANSYT-7F, presentado en la Figura 4.69.

La entrada de datos gráficos del programa permite ingresar información en cada uno de los nodos de la información básica del análisis. Estos datos corresponden a la información de carriles, volúmenes de tránsito, fases y tiempos de semáforos, conexiones entre los nodos, tipo de análisis e información opcional descrita anteriormente. En la Figura 4.70 se presenta el menú de entrada específica de datos que se tienen en cuenta en la entrada de datos básicos del programa TRANSYT-7F. Así mismo, en la Figura 4.71, se presenta el menú de análisis, en el cual se

especifica la información básica del procesamiento de la información, como el tipo de optimización, los tiempos de los semáforos, la función objetivo (índice de desutilidad, DI), el período de simulación considerado y el tipo de unidades. Una vez definidos los parámetros básicos de la simulación, se puede proceder a ejecutar el modelo TRANSYT-7F en el menú específico RUN, como ya se mencionó. Se generan así las diferentes salidas mediante archivos que se guardan en la respectiva ruta de proyecto definida previamente.

Operación del EDITOR DE TIPOS DE REGISTROS

Para arrancar el editor de tipos de registros del TRANSYT-7F, se debe entrar desde el manejador principal al menú de visualiza-



Figura 4.68
Barras de
herramientas
del manejador
principal del
TRANSYT-7F

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

Figura 4.69
Menú principal
de entrada de
datos gráficos
del
TRANSYT-7F

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2



ción (VIEW) y ejecutar el submenú del editor de tipos de registros (RECORD TYPES). Entonces se visualiza en pantalla el módulo de editor de tipos de registros del TRANSYT-7F presentado en la Figura 4.72. Como se puede identificar, el editor de tipos de registros es un manejador de los registros de entrada (información de entrada) de acuerdo con las categorías siguientes:

- ◆ Dispositivos de control considerados
- ◆ Listado de nodos que deben ser optimizados
- ◆ Codificación de la numeración de nodos
- ◆ Parámetros básicos de las intersecciones
- ◆ Información de los nodos
- ◆ Instrucciones de análisis
- ◆ Terminación

Una vez se disponga de la información básica del análisis en cada uno de los registros requeridos para la entrada de datos, al utilizar el editor de tipos de registros del TRANSYT-7F, se debe ir seleccionando de la visualización de tipos de registros el que se quiera editar, y se incluye la información correspondiente. Así mismo, se puede hacer uso de las barras de menú y de las barras de herramientas disponibles en el TRANSYT-7F.

En la Tabla 4.6 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menú y submenús de módulos específicos del editor de tipos de registros del TRANSYT-7F. La edición en el editor de tipos de registros se debe básicamente a un archivo plano que contiene la misma información básica considerada en el editor gráfico, permitiéndose la inserción de información nueva o la modificación de la misma a través de los diferentes tipos de registros que considera el TRANSYT-7F.

El editor de tipos de registros del TRANSYT-7F permite realizar operaciones rápidas de edición, análisis, impresión y salida mediante la barra de herramientas, como se presenta en la Figura 4.73.

4.2.3 Traffic Signal Coordination Software (SYNCHRO)

El SYNCHRO es una herramienta informática completa para realizar análisis de optimización de dispositivos semafóricos de tránsito. Este software contiene los métodos disponibles del *Highway Capacity Manual* (HCM 2000), y permite realizar la optimización de la longitud de ciclos y desfases en una red vial sin necesidad de hacer múltiples análisis. El SYNCHRO posee una interfaz sencila

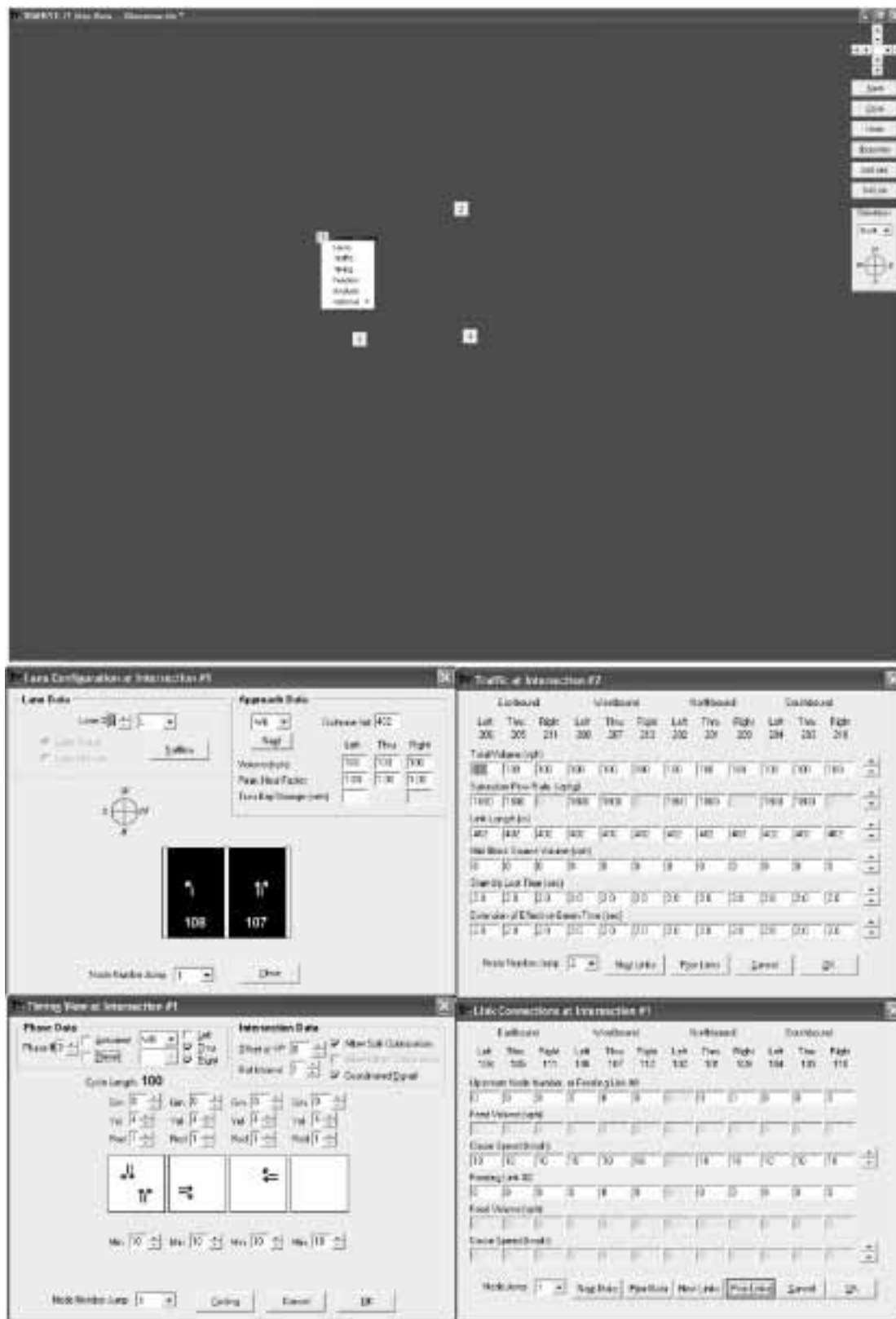
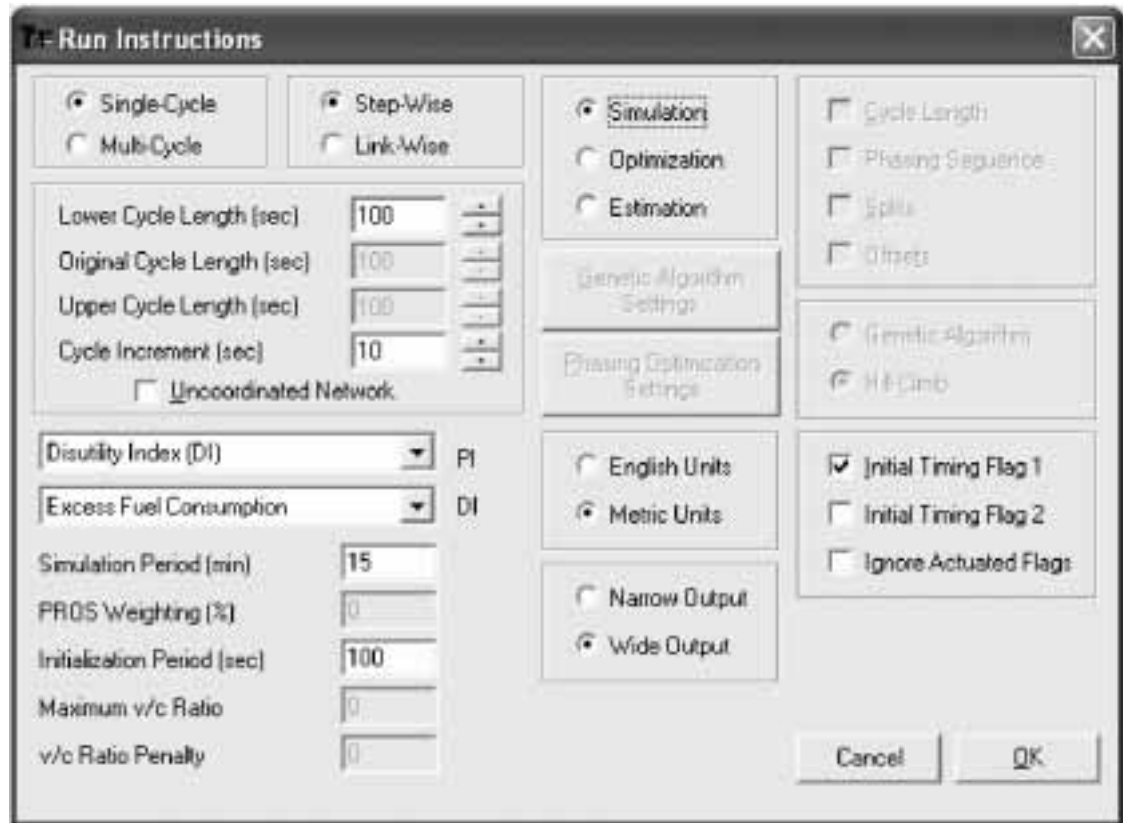


Figura 4.70
Menús
específicos de
entrada de
datos del
TRANSYT-7F

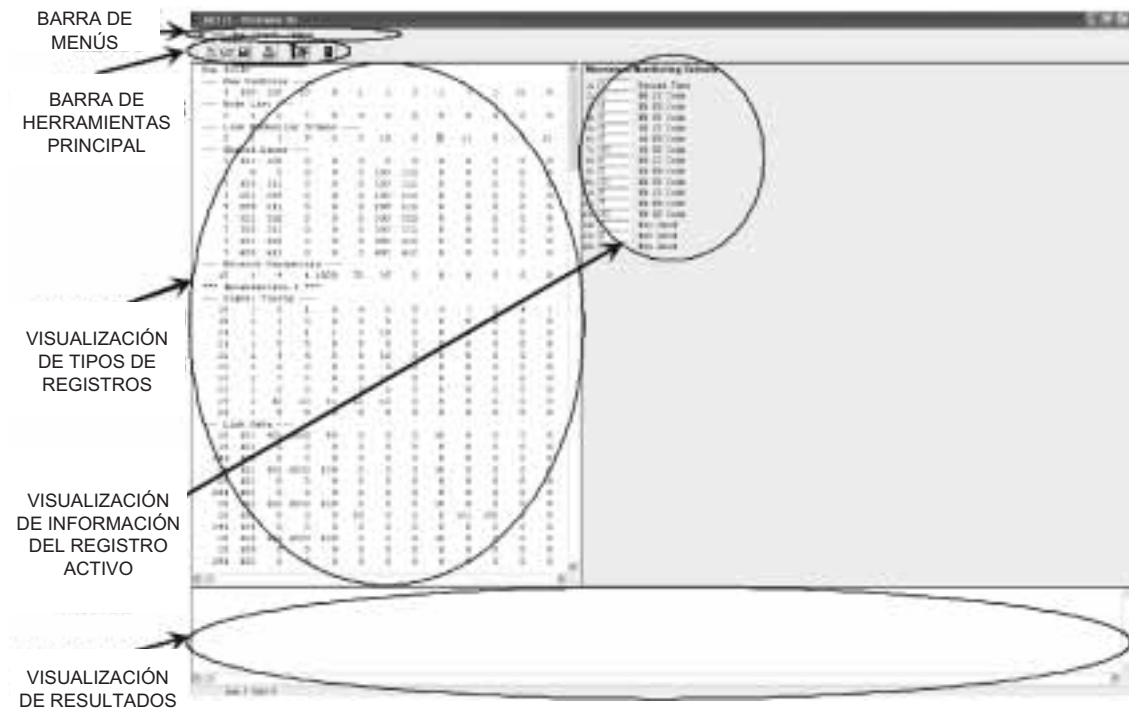
Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

Figura 4.71
Menú de
análisis del
programa
TRANSYT-7F



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

Figura 4.72
Menú principal
del editor de
tipos de
registros del
TRANSYT-7F



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2

Menú principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo proyecto e inicio de un nuevo archivo.
	Open	Abrir un archivo de entrada de datos existente (*.tin).
	Open Output File	Abrir un archivo de salida de datos existente (*.tof).
	Save	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Print Input file	Imprime el contenido del archivo de entrada de datos en la impresora.
	Print Output File	Imprime el contenido del archivo de salida de datos en la impresora.
	Printer Setup	Selección de impresora y conexión de la impresora.
	Recent Files List	Lista de las últimas tres filas que fueron abiertas o grabadas.
	Exit	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del TRANSYT-7F.
Edit	Cut	Borrado de los datos y almacenamiento en el bloc de notas.
	Copy	Copiado de datos en el bloc de notas.
	Paste	Pegado de datos del bloc de notas en el registro activo de entrada de datos.
	Select All	Selección simultanea de toda la información presentada en la visualización de los tipos de registros.
	Insert Record	Inserción de una línea completa en la visualización de los tipos de registros.
	Insert Comment	Inserción de un comentario en la visualización de los tipos de registros.
	Delete Record	Eliminación de una línea completa en la visualización de los tipos de registros.
Run	Delete All Records	Eliminación de todas las líneas que se encuentran en la visualización de los tipos de registros.
	Run TRANSYT-7F	Realiza el análisis del archivo de entrada de datos mediante el modelo TRANSYT-7F.
Outputs	Edit/Run TRANSYT-7F	Permite la preparación de la información interna de los análisis; se definen los nombres de los archivos de salida y su localización.
	Input Data	Salida de los datos de entrada considerados.
	Link Performance	Salida del funcionamiento de los enlaces.
	System Performance	Salida del funcionamiento del sistema.
	Progression	Salida de la progresión de los volúmenes.
	Time Space Diagrams	Salida del diagrama Espacio Vs. Tiempo.
	Flow Profiles	Salida del perfil de volúmenes.
	Route Performance	Salida del funcionamiento de rutas.
	Signal Timing Table	Salida de tiempos de señales.
	First Warning	Visualización de avisos de advertencia.
	First Error	Visualización del primer error.
	Repeat	Repetición.
Options	Numeric Free Edit	Selección de numeración de editor libre.

Tabla 4.6

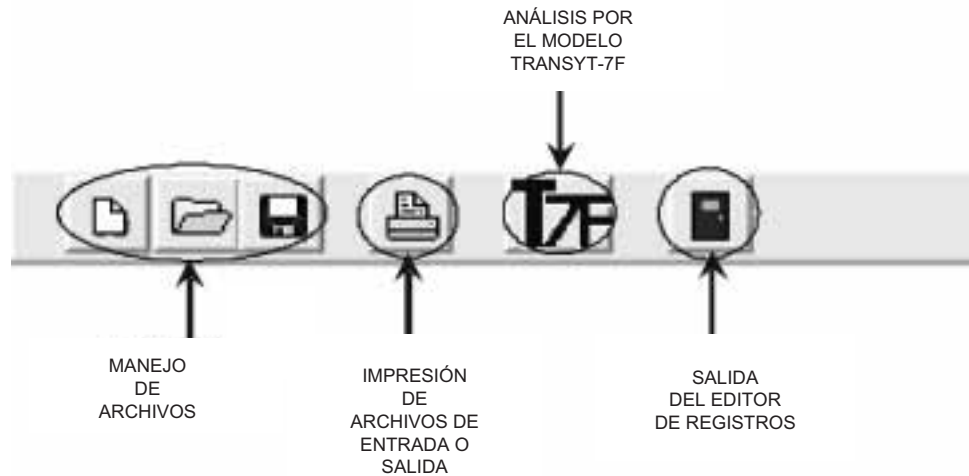
Barra de menús y submenús del editor de tipos de registros del TRANSYT-7F

Fuente:

Elaboración propia con base en el programa TRANSYT-7F Versión 10.2

Figura 4.73
Barra de
herramientas
del editor de
tipos de
registros del
TRANSYT-7F

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
TRANSYT-7F
Versión 10.2



lla para la entrada de datos; de la misma forma presenta los resultados intermedios, fácilmente visualizados. SYNCHRO realiza la coordinación de intersecciones, permite mostrar los efectos del tránsito en ellas y genera los tiempos y fases óptimos para reducir demoras de manera similar a lo que realiza el TRANSYT. Una de las grandes ventajas del SYNCHRO es ser plenamente interactivo, pues a medida que se realizan modificaciones en los datos de entrada, los resultados se modifican automáticamente.

El SYNCHRO presenta los diagramas de espacio-tiempo y permite modificar los tiempos y desfases directamente en los diagramas. El SYNCHRO emplea dos diferentes tipos de diagramas de espacio-tiempo: el primero permite ver los anchos de las bandas, mostrando el tránsito a través de la vía arteria sin necesidad de detenerse; el segundo se encuentra relacionado con el flujo de vehículos individuales que deben parar, hacer cola y luego continuar. Este estilo permite ilustrar lo que el flujo quiere hacer en el análisis de la red vial.

4.2.3.1 Alcances

En el caso de los análisis de intersecciones semaforizadas de tiempo fijo, se debe definir

la duración del ciclo, la duración de las fases, el número y la secuencia de las fases. En el caso de los controladores actuados, se debe definir si el sistema es semiactuado coordinado, semiactuado no coordinado o actuado. También se debe definir el ciclo, el tiempo de verde, el intervalo de cambio de fase, el intervalo de tiempo de peatones, la secuencia de fases y la estructura de las mismas.

En el análisis se debe determinar el manejo de los giros izquierdos en las intersecciones, es decir, si éstos están permitidos o protegidos, así mismo, se requieren definir los tipos de detectores utilizados (inducción eléctrica, microondas, video, magnético, infrarrojo, neumático, ultrasónico).

4.2.3.2 Beneficios y utilidades

El SYNCHRO es un modelo utilizado para el análisis de intersecciones urbanas con semáforos o sin ellos; por tanto, la principal aplicación está relacionada con corrientes discontinuas. Los análisis realizados mediante el SYNCHRO se relacionan con la red que representa el ambiente del tráfico. Los principales análisis que se pueden llevar a cabo son:

- ♦ Intersecciones semaforizadas (controladores de tiempo fijo, actuados y semiacactuados).
- ♦ Intersecciones no semaforizadas (se incluye el análisis de glorietas)

4.2.3.3 Componentes del SYNCHRO

El SYNCHRO cuenta con dos programas de apoyo debidamente integrados que permiten representar la entrada de datos, condiciones o entorno de la corriente del tránsito (intersección semaforizada o no), además de un ambiente gráfico que permite visualizar y simular las características del tránsito. Los módulos de apoyo del SYNCHRO son:

- ♦ SYNCHRO. Módulo en el cual se crean los modelos de tránsito con la entrada de datos necesarios.
- ♦ SIMTRAFFIC. Software de visualización gráfica de los datos de salidas resultantes del modelo, así como de la propia simulación dinámica.

4.2.3.4 Operación del Programa SYNCHRO

En esta sección se describen las características fundamentales del programa SYNCHRO (Versión 5.0). Éste presenta diversos modelos de apoyo, visualizados por el usuario a través del uso de menús, como se describe a continuación.

Para iniciar el SYNCHRO, se debe entrar al subdirectorío donde se encuentre localizado. En la pantalla aparece el símbolo que identifica el programa SYNCHRO. Seguidamente, al presionar la tecla izquierda del mouse sobre el icono, aparece el menú principal presentado en la Figura 4.74.

En la Tabla 4.7 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menús y submenús de los módulos específicos del SYNCHRO.

El SYNCHRO tiene una barra de herramientas para la creación y edición de los modelos de tránsito. Aparece en la pantalla principal del programa. En la Figura 4.75 se

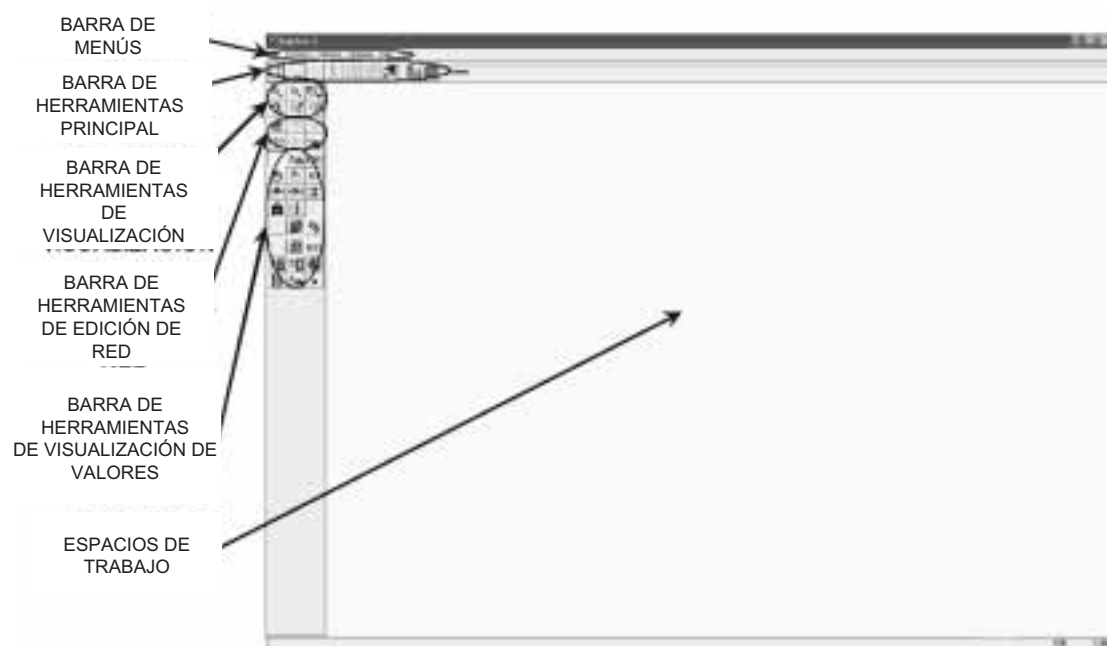


Figura 4.74
Menú principal
del programa
SYNCHRO

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
SYNCHRO Versión
5.0

Figura 4.75
Barras de
herramientas

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
SYNCHRO
Versión 5.0



observa la mencionada barra de herramientas.

Los modelos realizados a través del SYNCHRO están conformados por diferentes objetos, que representan la red vial de estudio mediante enlaces y nodos que determinan la geometría de la red, en el modelo. Igualmente se consideran los dispositivos de control y otros elementos que afectan el funcionamiento de la red vial.

Los enlaces representan las vías de la red vial, a las cuales se puede asociar una serie de propiedades como el sentido de circulación (un sentido o dos), el ancho del carril, el flujo de saturación, el tipo de área, la longitud de carril de almacenamiento y la pendiente, entre otros aspectos. En la Figura 4.76 se presenta el detalle de la información que se debe considerar por geometría en los diferentes carriles de una intersección específica.

En el caso de los volúmenes, el SYNCHRO permite considerar la presencia de volumen de vehículos mixtos, de peatones y de bicicletas que presenten conflicto con los movimientos de giro a la derecha durante una hora específica. De igual forma se definen los factores de hora pico, el número de bloqueos de buses, la existencia de carril de estacionamiento y el número de maniobras durante la

hora. En la Figura 4.77 se presenta el detalle de información considerada en la entrada de datos de volúmenes en intersecciones.

La información de tiempos en una intersección específica considera los movimientos permitidos, los tiempos mínimos y máximos, el tiempo de amarillo, todo rojo, las demoras por el dispositivo de control, las colas y finalmente presenta el diagrama de bandas de la intersección. En la Figura 4.78 se presenta la información de entrada de los tiempos de la intersección.

La información final considerada por el modelo SYNCHRO se refiere a la información de las fases presentadas en la intersección. En la Figura 4.79 se presenta la información requerida. Como puede observarse, la información hace referencia al inicio mínimo, la duración de fase mínima y máxima, tiempo de amarillo, todo rojo, parámetros para intersecciones actuadas y tiempos para peatones.

Cuando se haya concretado la entrada de la información, se puede acceder al diagrama espacio-tiempo, que es la representación gráfica del flujo de vehículos, como se puede observar en la Figura 4.80.

Como se mencionó, la entrada de la información del modelo de tránsito de la red vial es un proceso interactivo que permite

Menú principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo proyecto e inicio de un nuevo archivo.
	Open	Abrir un archivo existente.
	Save	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Merge	Permite adicionar archivos considerando nuevas intersecciones y particularidades, como geometría, volúmenes y tiempos.
	Graphics	Se puede importar o limpiar la visualización del fondo del espacio de trabajo, así como exportarlo.
	Print Window	Impresión de la visualización del espacio de trabajo activo.
	Create Report	Creación de reportes personalizados de los análisis realizados.
	Printer Setup	Selección y conexión de la impresora.
	Recent Files List	Lista de los últimos cuatro archivos abiertos o grabados.
Transfer	Exit	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del SYNCHRO.
	Data Access	Permite la lectura, escritura de las base de datos de información de carriles, tiempos, fases y reportes.
	Simtraffic Simulation	Traslada al usuario al programa de apoyo de visualización gráfica de salidas (SIMTRAFFIC), con la ejecución del modelo ingresado.
	Corsim Analysis	Transfiere la información de entrada considerada en el modelo SYNCHRO al modelo CORSIM (TSIS) del tipo NETSIM.
	Transyt Analysis	Transfiere la información de entrada considerada en el modelo SYNCHRO al modelo TRANSYT.
Options	Save to HCS	Transfiere la información de entrada considerada en el modelo SYNCHRO al modelo HCS (intersección tipo semaforizada o no) previa selección de la intersección
	Scenario Manager	Se establecen características específicas del análisis, como descripción, fecha, tiempo de análisis, persona que realiza el análisis.
	Map Settings	Permite definir propiedades de visualización del mapa: color del fondo, color de enlaces, nodos, tamaños de intersecciones y letras entre otros aspectos.
	Network Settings	Permite la definición de aspectos básicos de la red en cuanto a carriles, volúmenes, tiempos.
	Time-Space Diagram	Permite la definición de aspectos básicos del diagrama de espacio-tiempo relacionados con la visualización del diagrama.
	Coding Error	Permite obtener información de errores presentados en la red de entrada.
	Convert to Feet	Permite la conversión de las medidas de entrada a pies.
	Phase Templates	Define una plantilla básica para realizar las fases.
	Ring and Barrier Designer	Entrada de información para el análisis complejo de múltiples. estrategias de fases de las intersecciones.
	Cluster Editor	Usado en conjunto con el menú anterior permite compartir un solo control a múltiples intersecciones.

Tabla 4.7
Barra de menús y submenús

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa SYNCHRO
Versión 5.0

Tabla 4.7
(Continuación)
Barra de
menús y
submenús

Menú principal	Submenú	Función
Optimize	Intersection Splits	Permite optimizar y definir el tiempo de verde, amarillo y todo rojo óptimo de cada fase de la intersección seleccionada.
	Intersection Cycle Length	Permite optimizar y definir la longitud de ciclo de la intersección seleccionada.
	Intersection Offset	Permite optimizar y definir el tiempo de desfase de la intersección seleccionada
	Partition Network	Permite considerar la optimización de una red en múltiples sistemas, asignando la intersección a zonas específicas considerando grandes longitudes entre intersecciones, diferentes características de tránsito.
	Network Cycle Lengths	Permite la optimización de la longitud de ciclos de la red considerada.
	Network Offsets	Permite la optimización de los desfases de la red considerada.
Help	Contents	Acceso a las ayuda del SYNCHRO que se encuentran en línea.
	About	Presenta en la pantalla de la versión del SYNCHRO, con algunas recomendaciones de utilización del modelo.
	Product Key	Permite el acceso a la clave de utilización del programa.

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
SYNCHRO
Versión 5.0

presentar resultados inmediatos a la entrada de la información, es decir, que no se requiere un programa de apoyo para la ejecución de algoritmos específicos que permitan obtener los resultados del modelo SYNCHRO. Una vez considerada toda la información de entrada del modelo, se pueden exportar los resultados mediante archivos de intercambio gráfico (DXF). También se pueden visualizar los resultados obtenidos en forma dinámica mediante el programa de apoyo SimTraffic.

4.2.3.5 Operación del Programa SIMTRAFFIC

Para iniciar el SIMTRAFFIC, se debe entrar al subdirectorio donde se encuentra localizado. En la pantalla aparece el símbolo que identifica el programa SIMTRAFFIC. Seguidamente, al presionar la tecla izquierda

del mouse sobre el icono, muestra el menú principal presentado en la Figura 4.81.

El programa de apoyo SIMTRAFFIC permite realizar la simulación microscópica de la red vial de intersecciones para visualizar aspectos como:

- ♦ Intersecciones cercanas con problemas de bloqueo y/o cambio de carril
- ♦ Efecto de semáforos en intersecciones no semaforizadas cercanas
- ♦ Operación en intersecciones bajo niveles altos de congestión

Las simulaciones posibles mediante el SIMTRAFFIC, incluyen:

- ♦ Intersecciones semaforizadas de tiempo fijo
- ♦ Intersecciones semaforizadas actuaadas
- ♦ Intersecciones con dos vías de acceso con pare

- ♦ Intersecciones con todas las vías de acceso con pare
- ♦ Autopistas
- ♦ Cambios de giro
- ♦ Glorietas largas
- ♦ Aumento o disminución de carriles
- ♦ Flujo de automóviles, autobuses, carga, peatones y bicicletas

Los parámetros que son reportados en la simulación como medidas de efectividad incluyen:

- ♦ Demora por disminución de velocidad
- ♦ Demora por detención
- ♦ Detenciones
- ♦ Longitudes de cola
- ♦ Velocidades
- ♦ Tiempo y distancia de recorrido
- ♦ Consumo y eficiencia de combustibles
- ♦ Emisiones de contaminantes
- ♦ Tiempos de verde observados actuados

4.3 SOFTWARE PARA LA MICROSIMULACIÓN

En esta categoría se presentan las aplicaciones de software que permiten realizar microsimulaciones en las cuales se involucra la representación del sistema real por medio de la reproducción sucesiva del hecho de interés que tiene lugar en el sistema real. La reproducción se realiza de acuerdo con las relaciones matemáticas y decisiones lógicas. Las principales herramientas informáticas que presentan estas características son:

- ♦ LISA+
- ♦ TSIS
- ♦ VISSIM

La herramienta LISA+ permite realizar microsimulaciones, evaluaciones y optimizaciones de los dispositivos semafóricos de una red vial urbana. El modelo TSIS no permite hacer optimizaciones en forma directa, pero sus archivos pueden ser analizados mediante el software TRANSYT7F para optimizar los dispositivos semafóricos de la red vial urbana. La herramienta informática VISSIM realiza la optimización mediante el TEAPAC, software semejante al TRANSYT7F y al SYNCHRO.

LANE WINDOW	EBL	EBT	WBT	WBR	SBL	SBR
Lanes and Sharing (#RL)	↖	↑	↑	↗	↖	↗
Ideal Satd. Flow (vphpl)	1900	1900	1900	1900	1900	1900
Lane Width (m)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Grade (%)	—	0	0	—	0	—
Area Type	—	Other	Other	—	Other	—
Storage Length (m)	0.0	—	—	0.0	0.0	0.0
Storage Lanes (#)	—	—	—	—	—	—
Total Lost Time (s)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Leading Detector (m)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
Trailing Detector (m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Turning Speed (km/h)	25	—	—	15	25	15
Lane Utilization Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Right Turn Factor	1.000	1.000	1.000	0.850	1.000	0.850
Left Turn Factor (prot)	0.950	1.000	1.000	1.000	0.950	1.000
Saturated Flow Rate (prot)	1755	1863	1863	1583	1770	1583
Left Turn Factor (perm)	0.068	1.000	1.000	1.000	0.950	1.000
Right Ped Bike Factor	1.000	1.000	1.000	0.958	1.000	0.941
Left Ped Factor	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Saturated Flow Rate (perm)	126	1863	1863	1517	1770	1489
Right Turn on Red	—	—	—	Yes	—	Yes
Saturated Flow Rate (RTOR)	0	0	0	261	0	114
Headway Factor	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Figura 4.76
Información de entrada de geometría por carril en intersecciones

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
SYNCHRO
Versión 5.0

Figura 4.77
Información de
entrada de
volúmenes en
intersecciones

VOLUME WINDOW	EBL	EBT	WBT	WBR	SBL	SBR
Traffic Volume (vph)	100	100	1300	240	120	130
Conflicting Peds. (#/hr)	10	—	—	10	0	10
Conflicting Bikes (#/hr)	—	—	—	10	—	10
Peak Hour Factor	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Growth Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Heavy Vehicles (%)	2	2	2	2	2	2
Bus Blockages (#/hr)	2	0	0	0	0	0
Adj. Parking Lane?	No	No	No	No	No	No
Parking Maneuvers (#/hr)	—	—	—	—	—	—
Traffic from mid-block (%)	—	0	0	—	0	—
Link OD Volumes	—	—	—	—	—	—
Adjusted Flow (vph)	109	109	1413	261	130	141
Lane Group Flow (vph)	109	109	1413	261	130	141

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
SYNCHRO
Versión 5.0

Figura 4.78
Información de
entrada de
tiempos en
intersecciones

Options	Timing Window	EBL	EBT	WBT	WBR	SBL	SBR	PED	HOLD
Controller Type:	Lane and Shoring (BTL)								
Postioned									
Cycle Length: 280.0	Traffic Volume (vph)	100	100	1300	240	120	130		
Actuated C.L.: 280.0	Turn Type	Split	—	—	Prot	—	Prot		
Normal C.L.: 150.0	Protected Phases	4	4	0	0	0	0		
Max v/c Ratio: 1.59	Permitted Phases	4	4	0	0	0	0		
Int. Delay: 238.5	Detector Phases	4	4	0	0	0	0		
ICU: 103.7%	Minimum Initial (s)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0		
ICU LOS: F	Minimum Split (s)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0		
	Total Split (s)	130.0	130.0	130.0	130.0	20.0	20.0		
	Yellow Time (s)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5		
	All-Red Time (s)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
	Lead/Lag								
	Allow Lead/Lag Optimizer?								
	Recall Mode	Max	Max	Max	Max	Max	Max		
	Actuated Effct. Green (s)	126.0	126.0	126.0	126.0	16.0	16.0		
	Actuated g/C Ratio	0.45	0.45	0.45	0.45	0.06	0.06		
	Volume to Capacity Ratio	0.14	0.13	1.69	0.35	1.29	0.63		
	Control Delay (s)	45.4	45.2	325.0	40.0	255.1	14.0		
	Level of Service	D	D	F	D	F	D		
	Approach Delay (s)	—	45.2	201.3	—	125.7	—		
	Approach LOS	—	D	F	—	F	—		
	Queue Length 50th (m)	30.2	30.1	219.3	82.5	107.5	0.0		
	Queue Length 95th (m)	55.5	55.2	251.7	111.7	155.1	29.5		
	Queueing Penalty	0	0	0	0	0	0		
	Stops (vph)	59	57	2070	120	160	14		
	Fuel Used (l/hr)	12	12	459	26	33	0		
	Oncoming Vehicles (#/hr)	0	0	0	0	0	0		

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
SYNCHRO
Versión 5.0

Con este modelo, se tiene el apoyo necesario para llevar a cabo el registro de vehículos contados, pasando por cada una de las fases de planeación semafórica hasta la simulación y el aprovisionamiento de datos para cualquier procedimiento de control.

Además del instrumento de planeación de LISA+, el banco de datos concebido para la administración del funcionamiento de los semáforos, denominado VERA+, se ha convertido en un elemento indispensable en una administración eficiente.

La estructura modular de cada uno de los elementos de modelo permite adaptar el sistema a necesidades específicas. El diseño del modelo con sus diferentes menús y símbolos permite trabajar intuitivamente con LISA+ y aprender su manejo con gran facilidad.

4.3.1.1 Alcances

El modelo de LISA+, herramienta poderosa para realizar la planeación completa de los sistemas semafóricos de la red vial urbana, facilita la tarea de elaborar controles técnicos de semáforos.

Además de la planeación, es de destacar la calidad del software LISA+. Para verificar y

4.3.1 (LISA+)

LISA+ es una herramienta que facilita el análisis de planeación, administración y aprovisionamiento de datos para semáforos.

administrar datos, se dispone de un diseño inteligente. Se puede seguir cada paso de la lógica mediante test avanzados. La sincronización de los semáforos, así como sus coordinaciones, se elaboran naturalmente con los más modernos procedimientos de cálculo.

La simulación ayuda a elaborar la planeación gráficamente y a examinarla con intensidades de tráfico reales. El comportamiento del tráfico que se simula de esta manera permite sacar conclusiones más exactas y una representación gráfica más plástica que la del cálculo estadístico.

Después de la planeación y del test de los datos de entrada, se puede hacer una recolección de esta información con un procedimiento diseñado específicamente para los aparatos de control definidos.

No sólo es posible hacer una planeación abierta, sino también una en VS-PLUS. La comunicación con otros sistemas, como computadores para tráfico, se lleva a cabo por medio de interfases.

El ambiente de tránsito que solicita el modelo y que debe ser especificado por el usuario del LISA+ consiste en:

- ♦ Topología del sistema de vías, calles y carreteras (en la forma de imágenes), canalización y disposición de los carriles tales como giros a izquierda permitidos, y carriles exclusivos de buses.

Options >		PHASING WINDOW		
Controller Type:		4-EBTL	6-SBL	8-WBT
Pretimed				
Cycle Length: 60.0				
Actuated Cycles				
90th %:	60.0			
70th %:	60.0			
50th %:	60.0			
30th %:	60.0			
10th %:	60.0			
Quick Reports:				
Green Times				
Starts				
Details				
Minimum Initial (s)		4.0	4.0	4.0
Minimum Split (s)		20.0	20.0	20.0
Maximum Split (s)		20.0	20.0	20.0
Yellow Time (s)		3.5	3.5	3.5
All-Red Time (s)		0.5	0.5	0.5
Lead/Lag				
Allow Lead/Lag Optimize?				
Vehicle Extension (s)		3.0	3.0	3.0
Minimum Gap (s)		3.0	3.0	3.0
Time Before Reduce (s)		0.0	0.0	0.0
Time To Reduce (s)		0.0	0.0	0.0
Recall Mode		Max	Max	Max
Pedestrian Phase		Yes	Yes	Yes
Walk Time (s)		5.0	5.0	5.0
Flash Dont Walk (s)		11.0	11.0	11.0
Pedestrian Calls (#/hr)		0	0	0
90th %ile Green Time (s)		16 m	16 cd	16 m
70th %ile Green Time (s)		16 m	16 cd	16 m
50th %ile Green Time (s)		16 m	16 cd	16 m
30th %ile Green Time (s)		16 m	16 cd	16 m
10th %ile Green Time (s)		16 m	16 cd	16 m

Figura 4.79
Información de entrada de fases en intersecciones

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa SYNCHRO Versión 5.0

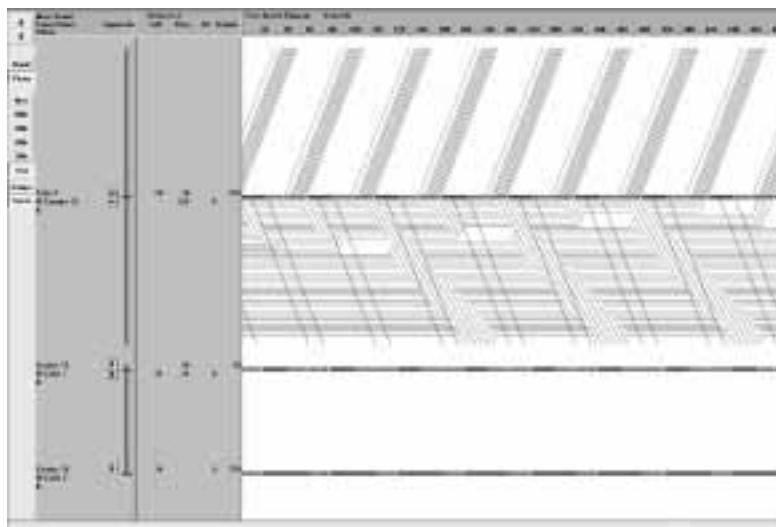
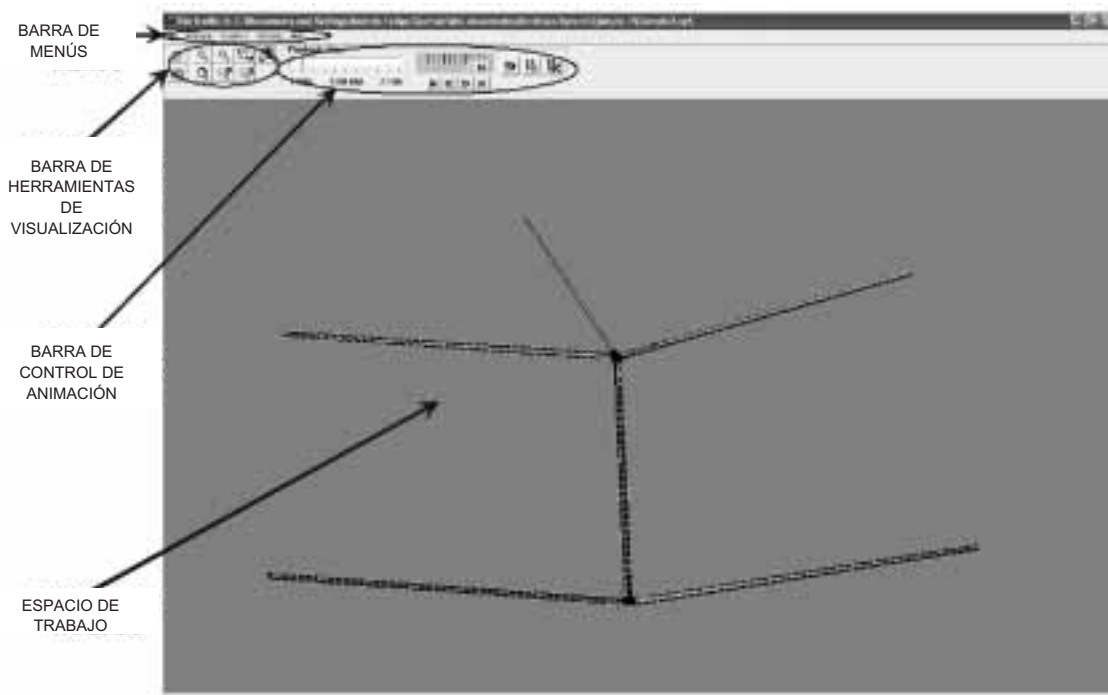


Figura 4.80
Diagrama espacio-tiempo en intersecciones

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa SYNCHRO Versión 5.0

Figura 4.81
Menú principal
del Programa
SIMTRAFFIC



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa
SYNCHRO
Versión 5.0

- ◆ Geometría de cada uno de los componentes de la red, se incluyen distancias, brazos (accesos) e información de los dispositivos de control del tránsito, como datos del grupo de señales, tiempos intermedios, desfases, conformación de fases, transiciones y planes.
- ◆ Volúmenes e intensidades de tráfico que ingresan al sistema vial, como vehículos, peatones y bicicletas, así mismo, se especifica la flota de automóviles y la composición vehicular (buses, camiones y vehículos livianos), incluidos naturalmente los factores de equivalencia.

4.3.1.2 Beneficios y utilidades

LISA+ es un modelo que permite analizar diferentes categorías, acorde con las características del flujo de tránsito. Los análisis realizados mediante LISA+ están relacionados con la red que representa el ambiente del tráfico.

Ésta puede subdividirse en subredes que interactúan entre sí. Los principales análisis llevados a cabo con LISA+ son los siguientes.

Análisis de planeación de intersecciones individuales

En este análisis, LISA+ permite desarrollar las fases y su representación sencilla, diseñada de manera intuitiva. Por principio, las señales incompatibles se excluyen en una fase. La representación gráfica se realiza en círculos de fases que se pueden editar por separado. La distribución y el orden se pueden cambiar a voluntad. La secuencia de fases se define por una unión gráfica de las fases.

A partir de las fases definidas y de las secuencias de fases, LISA+ elabora automáticamente las transiciones entre fases elegidas. El diseño automático se hace bajo prescripciones individuales; por ejemplo una matriz de desfase de tiempo. Todas las

secuencias combinadas se controlan automáticamente.

Para la elaboración de planes de señales, el sistema dispone de funciones extensas y herramientas confortables. El plan de señales se puede elaborar y diseñar individualmente por medio de definiciones de color.

No sólo es posible elaborar automáticamente el plan de señales sobre la base de una secuencia de fases establecida, sino también calcularlo y optimizarlo automáticamente a partir de los ciclos y los tiempos de espera.

Los programas de encendido y apagado se calculan automáticamente. El cálculo de capacidad se hace sobre la base de los valores de ocupación dados.

Elaboración de coordinaciones

Además del análisis de intersecciones individuales, el sistema ofrece la ventaja de fácil obtención y representación sinóptica de las coordinaciones.

El diseño y la elaboración son muy confortables, pues se cuenta con la ayuda de asistentes que acompañan en cada uno de los pasos del proceso. El plan de coordinación se puede representar de acuerdo con las necesidades, gracias a la posibilidad de elegir libremente los colores y tipos de letra y a que las bandas verdes continuas también se pueden representar gráficamente.

Simulación

Se analizan las condiciones propias del tránsito simulado. Así es posible desarrollar controles óptimos, libres de error. El trabajo de aprovisionamiento de datos que requiere la simulación es bastante sencillo, pues se pueden usar las redes de líneas de circulación y las reglas de la gráfica de aprovisionamiento básico. Además de la simulación de inter-

secciones individuales, se puede efectuar la de tramos y redes coordinadas, así como la de intersecciones no semaforizadas y glorietas. La evaluación estadística de la simulación (tiempos de verde y rojo, tiempos de viaje, tiempos de espera) permite la evaluación objetiva del control.

4.3.1.3 Componentes del LISA+

LISA consta de una serie de herramientas integradas que permiten administrar proyectos, administrar coordinaciones de la red semaforizada urbana, representar los aspectos básicos del planeamiento de cruces semaforicos (ambiente, condiciones o entorno de la corriente del tránsito (discontinua), pasos, líneas de recorrido, puntos de conflicto, distancias y conflictos de la corriente del tránsito, así como alimentar los datos básicos de las intersecciones, alimentar volúmenes vehiculares y las coordinaciones de la corriente del tránsito. Cada uno de los componentes del LISA+ está diseñado para representar en conjunto el ambiente físico particular de la red vial urbana.

LISA+ cuenta con cinco módulos de apoyo principales:

- ♦ **ADMINISTRADOR DE PROYECTOS.**
En este sistema se trazan, se borran, se importan y exportan todas las intersecciones. En la administración de proyectos, además de las intersecciones, también se pueden diseñar las coordinaciones. La estructura gráfica en forma de árbol y el orden jerárquico propio de esta estructura permiten una navegación veloz y de fácil manejo. La selección de las intersecciones es sencilla y eficiente. LISA+ protocoliza el trazado y el borrado de intersecciones, con lo cual usted siempre dispone de una historia actual de sus planeaciones.

- ♦ **MÓDULO DE APROVISIONAMIENTO Y PLANEAMIENTO.** En este módulo se diseñan la geometría y los grupos de señales semafóricas, se elabora la matriz de incompatibilidad y el cálculo de tiempos intermedios con la ayuda de un asistente gráfico. Los parámetros de cálculo de tiempos intermedios pueden modificarse y guardarse según las necesidades específicas del usuario. Se permite el desarrollo de las fases y su representación sencilla, diseñada de manera intuitiva. Por principio, las señales incompatibles se excluyen en una fase. La representación gráfica se realiza en círculos de fases que se pueden editar por separado. La distribución y el orden se pueden cambiar a voluntad. La secuencia de fases se define por una unión gráfica de las fases.
- ♦ **INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS.** Sobre la base de conteos de tránsito y de la geometría de la intersección, se pueden realizar cálculos de capacidad y evaluaciones de intersecciones no semaforizadas. Además, se puede incluir el cálculo de intersecciones tipo glorieta.
- ♦ **CONTEOS.** Los registros de tránsito realizados electrónicamente o manualmente pueden ingresarse directa o manualmente por medio de múltiples interfases. Los conteos pueden subdividirse en intervalos de tiempo y pueden ser evaluados por medio de tablas o gráficas. La cantidad de brazos (accesos) de las intersecciones es ilimitada, de manera que se pueden elaborar planes de carga de tráfico para cada intersección. Para transmitir los registros, los datos pueden exportarse en formato ASCII.

LISA+ es un programa que funciona en la plataforma Windows y que opera con menús para el acceso a los diferentes módulos específicos, es decir, que se tienen los accesos dispuestos para tal fin.

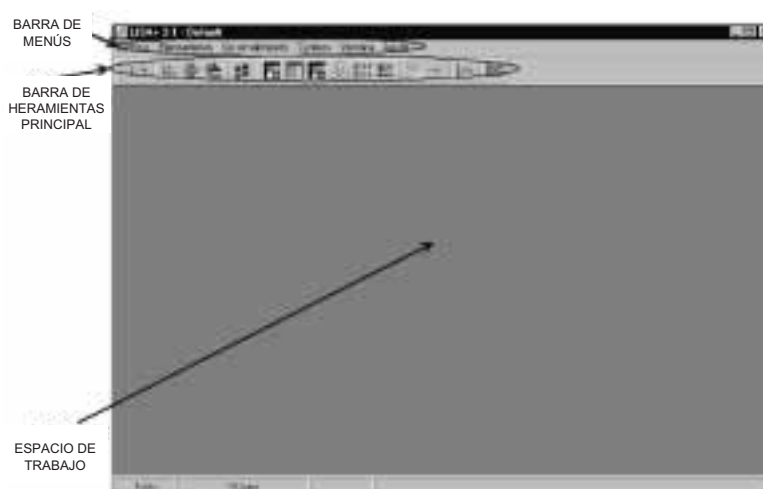
4.3.1.4 Operación del Programa LISA+

En esta sección se describen las características fundamentales del programa LISA+ (Versión 3.1). Éste presenta los diversos módulos de apoyo visualizados por el usuario a través del uso de menús, como se presenta a continuación.

Para iniciar el programa LISA+, se debe entrar al subdirectorío donde se encuentra localizado. En la pantalla aparece el símbolo que lo identifica. Seguidamente, al presionar la tecla izquierda del mouse sobre el icono, se muestra el menú principal presentado en la Figura 4.82.

A continuación, en la Tabla 4.8 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menús y

Figura 4.82
Menú principal
del Programa
LISA+



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
Programa LISA+
Versión 3.1

Menú principal	Submenú	Función
Archivo	Abrir/Elaborar	Permite el acceso a la ventana del administrador de proyecto.
	Abrir de nuevo	Abre un archivo existente.
	Abrir coordinación	Abre un archivo de coordinación existente.
	Cerrar	Se cierra un proyecto.
	Opciones	Presenta las opciones de configuración del LISA+.
	Imprimir	Imprime el contenido del documento activo en la impresora.
	Imprimir conjunto	Imprime el conjunto de contenidos activos en la impresora.
	Usuarios – Posiciones	Permite definir permisos y configuraciones para el usuario preestablecido.
	Finalizar	Salida del LISA+
Planeamiento	Distancias / Alimentación básica	Visualiza el menú de alimentación básica de la información del nodo.
	Datos del cruce	Visualiza el menú de datos del cruce del nodo.
	Datos del grupo de Señales	Visualiza el menú de datos del grupo de señales.
	Tiempos Intermedios	Visualiza el menú de análisis y cálculo de tiempos intermedios.
	Condiciones de Desfasamiento	Visualiza el menú de condiciones de desfasamiento.
	Conformación de fases	Visualiza el menú de la conformación de fases semafóricas.
	Transición de fases	Visualiza el menú de transición de fases.
	Planes de señales	Visualiza el menú de planes de señales.
	Planes permitidos	Visualiza el menú de planes permitidos.
	Hora de cambio	Visualiza el menú de hora de cambio.
No semaforizado	Detectores	Visualiza el menú de detectores.
	Página anterior	Visualización de la página anterior.
	Documentos	Permite la entrada a documentos del LISA+.
Conteos	Datos básicos	Permite la visualización de los datos básicos del nodo que se presenta como intersección no semaforizada.
	Glorieta	Permite la visualización de los datos del nodo que se presenta como glorieta.
	Alimentar	Permite realizar la alimentación de información de conteos manuales.
	Evaluación	Permite realizar la evaluación de información de conteos manuales.
Ventana	Importación	Permite realizar la alimentación de información de conteos por importación de la información.
	Exportar	Permite realizar la exportación de la información de conteos.
	Cascada	Permite la organización de las ventanas activas en cascada con los títulos visibles de las ventanas.
	Cambio	Permite el cambio entre las ventanas activas que se hayan desplegado en el LISA+.

Tabla 4.8
 Barra de
 menús y
 submenús de
 los módulos
 específicos
 LISA+

Fuente:
 Elaboración propia
 con base en el
 programa LISA+
 Versión 3.1

Figura 4.83
Menú principal
del
administrador
de proyectos
del Programa
LISA+

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
Programa LISA+
Versión 3.1



submenús de los módulos específicos del LISA+.

El administrador de proyectos

LISA+ administra la información en un banco de datos propio en el cual se almacenan todos los datos, mediante una ruta que se especifica en el momento de realizar la primera instalación. Esto puede ser modificado al activar el archivo "Lisaconfig.exe" que se encuentra en el subdirectorio en el cual se instaló el programa. Los proyectos que se trabajan en LISA+ se diferencian mediante identificaciones específicas que definen un proyecto, un lugar, un nodo y variantes. En la Figura 4.83 se presenta la ventana del administrador de proyectos, donde se puede definir un nuevo lugar, con lo cual se puede incluir toda la información sobre el lugar y las variantes. En la parte izquierda se encuentran los datos disponibles representados en un diagrama de árbol. Se pueden seleccionar los proyectos, los lugares o todos.

En la administración del proyecto se presentan cuatro pestañas específicas que permiten realizar las siguientes funciones:

- ◆ **Selección.** En esta página se seleccionan los nodos que serán modelados con el LISA+.
- ◆ **Funciones:** En esta página se lleva a cabo la colocación y borrado de las variantes, nodos y proyecto, así como la importación y alimentación de datos del LISA+. Se distingue además la categoría de administración, archivo en ejecución y backup.
- ◆ **Propiedades.** En esta sección se encuentra toda la información de las variantes del nodo, como la definición del lugar, nodo, variante, proyecto, trabajador, fecha, contratista y las listas de los archivos de datos.
- ◆ **Estado:** Se puede asignar a una variante del nodo un estado determinado, como "administración" o "elaboración" entre otros, con lo cual se dan privilegios de solo lectura o de cambios en las variables.

El administrador de proyectos permite manejar los diferentes proyectos que se requieren analizar, así como administrar variantes específicas de las intersecciones individuales que se consideren.

Recorridos y alimentación básica

En este módulo se realiza la alimentación de la geometría del nodo con sus líneas de recorrido, las cuales contribuyen en los trayectos de entrada y despeje para el cálculo de los tiempos intermedios. Además, se pueden dar los grupos de señales. El procedimiento que se debe seguir es:

- ◆ Carga del esquema y escalado. La alimentación de la información se realiza sobre una base gráfica que se carga de un archivo bitmap (*.bmp) o de Windows metafile (*.wmf). Para el cálculo exacto de las trayectorias de despeje y entrada se requiere la asignación de la escala en el plano que se tenga en pantalla. La escala se debe fijar siempre al inicio del trabajo, ya que con ello se asegura que con los conflictos bloqueados se calculen también las trayectorias.
- ◆ Colocación de ejes de calzada. Se deben fijar todos los ejes de las calzadas y de los carriles de acuerdo con cada acceso en la intersección. Se estipula de igual forma la posición exacta de los carriles y se definen los carriles para ciclistas, buses y tranvías.
- ◆ Creación de líneas de recorrido. Se tienen dos tipos de líneas de recorrido: el primero está relacionado con la dirección que tiene en cuenta el número del acceso, de la salida y del tipo de línea. En el segundo, se encuentran las líneas sencillas, relacionadas con pasos peatonales y de ciclistas.
- ◆ Clases de vehículos. Una vez construidas las líneas de recorrido, se designan los tipos de vehículos que habrá en cada línea. Las líneas de recorrido para ciclistas se definen de manera similar a las del tránsito vehicular, teniendo en cuenta que el ciclista puede circular sobre carriles propios o sobre la calzada.
- ◆ Zona de corte. La zona de corte tiene la función de diferenciar el final de la línea de recorrido que se debe utilizar.
- ◆ Asignación de grupos de señales. A cada eje de calzada, carril o línea de recorrido se asigna un grupo de señales de una lista ya registrada. Los grupos de señales se asignan a todas las líneas de recorrido pertenecientes a un carril.

- ◆ Conformación de puntos de conflicto. Una vez se hayan definido las líneas de recorrido, los pasos peatonales y de ciclistas, se conforman los puntos de conflicto. Todos deben probarse y confirmarse si pertenecen a la situación real.
- ◆ Cálculo de trayectorias. Una vez conformados y controlados los conflictos, éstos aparecen en la tabla de recorridos
- ◆ Alimentación de datos básicos. La alimentación gráfica de los ejes de calzada, carriles y líneas de recorrido, así como los grupos de señales se pueden utilizar para la creación automática de los datos del nodo en tablas, de los datos de los grupos de señales, la matriz de incompatibilidades y de la red de simulación.

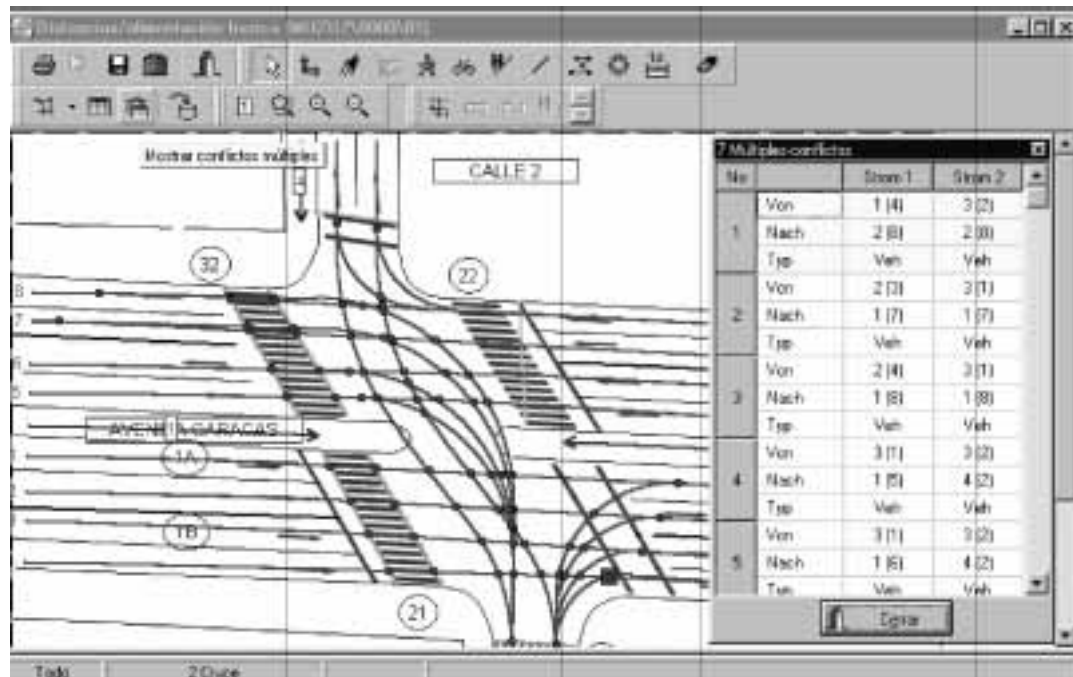
En la Figura 4.84 se presenta el menú de distancias/alimentación básica del programa LISA+, en la cual se aprecia la conformación de los puntos de conflicto y la tabla de los mencionados conflictos.

Datos del nodo

La información que debe ir en un nodo específico incluye su alimentación básica, lo cual se mencionó en la sección anterior. Por otro lado, debe incluirse la información específica que se relaciona a continuación.

- ◆ Brazos del nodo. Se asignan los brazos de la intersección (accesos), así como el ángulo presentado y se incluye la cantidad de carriles para cada brazo y los movimientos en las entradas y salidas del nodo.
- ◆ Nodos de partición. Se trata de un nodo que funciona como uno doble. Éstos se pueden subdividir en dos nodos de partición.
- ◆ Clases de tránsito. Además del carril, se definen las clases de tránsito, las cuales tienen significado para el cálculo de tiem-

Figura 4.84
Menú de
distancias/
alimentación
básica en
LISA+



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa LISA+
Versión 3.1

pos intermedios. Los parámetros para el cálculo de tiempos intermedios, como la velocidad, y longitud de vehículo, se inician para cada tipo de tránsito.

- ◆ Flujos de partición. Se establecen los flujos de partición, cuando existen más carriles para un flujo de tránsito.
- ◆ Pasos peatonales y de bicicletas. Se realiza la alimentación de los pasos peatonales o de bicicletas, según sea el caso.
- ◆ Nombre de flujo transversal. Se define el nombre de cada flujo transversal. Se requiere para identificar con claridad los diferentes flujos transversales existentes en un brazo (acceso) de un nodo.

Otra de las características básicas de la información del nodo es la relacionada con los datos de la evaluación, los cuales incluyen los siguientes aspectos:

- ◆ Demanda. Se fija la cantidad de vehículos que se presenta en el nodo teniendo en cuenta la geometría de éste.

- ◆ Demanda de saturación. Para cada flujo, se registra la demanda de saturación, la cual describe la cantidad de vehículos que pueden pasar durante una hora con verde permanente.
- ◆ Factor de reducción. Describe la reducción del flujo vehicular como consecuencia de los peatones y ciclistas que lo atraviesan.
- ◆ Superficies disponibles. Se puede indicar la cantidad de superficie disponible en el interior del nodo, que debe considerarse para el cálculo de capacidad.
- ◆ Unidades vehiculares. Se alimenta la información de los factores de equivalencia para cada tipo de vehículo registrado en la corriente del tránsito.
- ◆ Demanda peatonal. Para cada brazo del nodo (acceso), se incluye la demanda registrada de peatones y de bicicletas.

En la Figura 4.85 se presenta el menú de distancias/alimentación básica del programa LISA+. Se aprecia la conformación de los

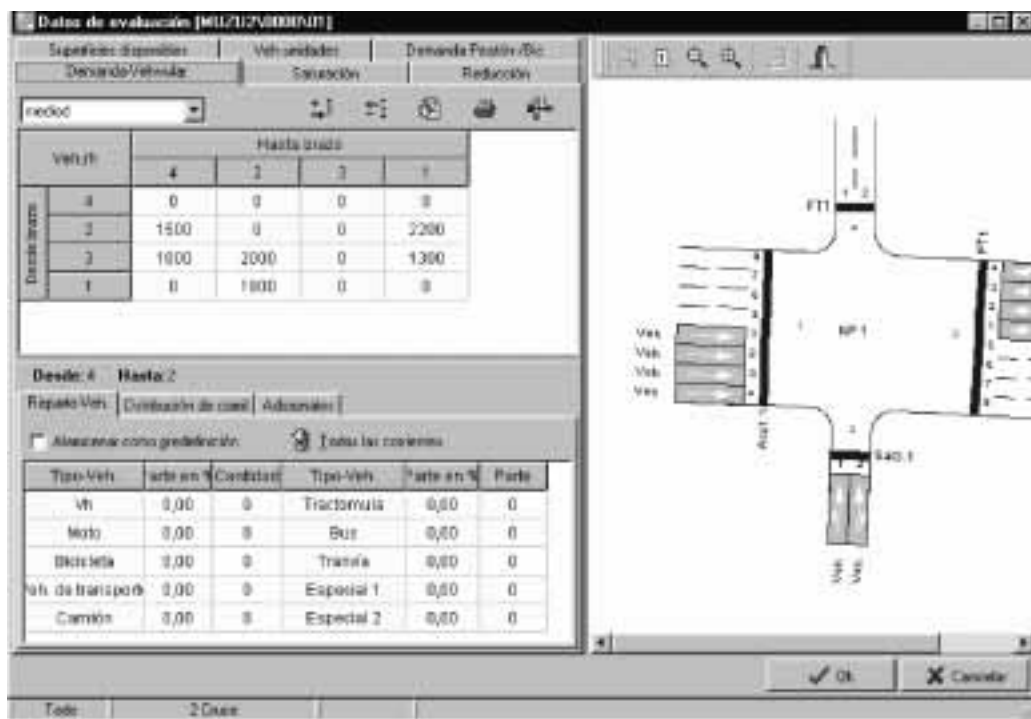


Figura 4.85
Menú de datos
del nodo LISA+

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa LISA+
Versión 3.1

puntos de conflicto y la tabla de los mencionados conflictos.

Datos de señales

Se establece la información básica de los grupos de semáforos (señales) presentados en el nodo; se establece la alimentación de grupos de señales, indicando los nombres deseados, los tipos de señales; se establecen los flujos señalizados, los grupos de señales (fases), los tiempos mínimos de rojos y verdes, así como los máximos. También se establecen las clases de tránsito que se semaforizan.

Es posible modificar los grupos de señales a voluntad, así como las secuencias de los grupos de señales.

En LISA+, los grupos de señales se subdividen en diferentes tipos que se integran como estándar en el programa. Se pueden modificar y definir nuevos tipos, de acuerdo con los fijados en el modelo. Se definen las

propiedades de los tipos de señales “intermitente”, “diagonal” o “diagonal/intermitente” o, en el caso de imágenes a color, nuevos tipos de señales de acuerdo con las necesidades del análisis.

Se debe igualmente definir los tipos de semáforos teniendo en cuenta la cantidad de lentes luminosos que poseen y se pueden incluir las señales adicionales.

- ♦ **Tiempos intermedios.** Se determinan los tiempos intermedios de los grupos de señales existentes, teniendo en cuenta la matriz de incompatibilidades con base en las trayectorias de entrada y despeje.
- ♦ **Conformación de fases.** Se ensambla cualquier fase con los grupos de señales existentes, que tienen funciones específicas de construcción, elaboración y administración de las fases. Para la construcción de las fases, se supone la existencia de grupos de señales y la matriz de incompatibilidad.

- ◆ Planes de señales y transición de fases. En este módulo se realiza la creación, elaboración y prueba de los planes de señales. En la representación gráfica se dan o se modifican por necesidad los tiempos de fin e inicio de verde para los grupos de señales correspondientes. Para la construcción de los planes de señales, se requieren grupos de señales, la matriz de incompatibilidad y la matriz de tiempos intermedios.
- ◆ Planes permisivos. Se llaman también planes de fases permisivos, planes enmarcados o planes de estructura. Se utilizan para el control coordinado con dependencia del tránsito. Un plan permisivo comprende varias zonas permitidas, las cuales representan las condiciones de tiempo para el control dependiente del tránsito mediante el cual se garantiza la coordinación.
- ◆ Conmutación horaria. Se establecen los tiempos de conmutación horaria para el nodo.
- ◆ Detectores. Se establece el registro de los detectores que se presenten para la demanda, brecha, congestión y detectores de ocupación y otros elementos de medición para la recopilación de vehículos y personas que se utilizan en la lógica.
- ◆ Lógica de control. Sirve para la alimentación y representación gráfica, así como para las pruebas funcionales de control con dependencia del tránsito. Los controles se representan como diagramas de flujo.
- ◆ Sitio de prueba. Se ofrece con el editor gráfico un extenso sitio de prueba y simulación de la lógica de control u otro procedimiento de control. Se tiene en cuenta un equipo de control virtual, muy similar en su configuración y funciones al equipo de control de una firma de construcción de semáforos. El equipo puede verse in-

fluenciado por la reacción ante detectores con lo cual se integra un módulo de simulación completo.

Información de conteos

Conformación o alimentación de conteos de tránsito y su evaluación. Éstos se pueden alimentar por medio manual o se pueden importar de diferentes instrumentos de conteo. La evaluación se efectúa con la ayuda de planos de carga.

Establecimiento de coordinación

De manera similar a la administración del proyecto de los nodos, se construye la administración del proyecto de coordinación. Se elabora la coordinación estableciendo las predefiniciones básicas para todos los diagramas espacio-tiempo. Se fijan los grupos de señales de los sentidos de coordinación correspondientes en las direcciones principales y contrarias y las distancias de las líneas de pare. Se pueden modificar las propiedades del diagrama espacio-tiempo.

En LISA+ se presenta una barra de herramientas asociada a la creación y edición de los modelos de tránsito. Se halla en la página principal principal del LISA+. En la Figura 4.86 se observa la mencionada barra de herramientas de acceso rápido.

4.3.2 Traffic Software Integrated System (TSIS)

El modelo de simulación TSIS (Versión 5.1) es una herramienta que facilita el análisis de sistemas de tránsito urbano. Puede emplearse para evaluar un amplio rango de estrategias de operación del tránsito, en intersecciones individuales, en arterias urbanas o en grandes redes viales urbanas.



Figura 4.86
Barra de
herramienta
LISA+

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa LISA+
Versión 3.1

4.3.2.1 Alcances

Este modelo puede utilizarse para analizar el impacto de cambios en el sistema estudiado, como modificar sentidos direccionales, aumentar o disminuir el número de carriles, permitir el giro a la derecha en rojo, aumentar longitudes de bahías de giro, modificar planes de semáforos, implementar complejos viales a desnivel, etc. Igualmente, el modelo permite analizar el flujo de buses, los paraderos, las rutas, la frecuencia. También puede usarse para estudiar el impacto de grandes construcciones en las redes viales, como centros comerciales o parqueaderos, entre otras.

El TSIS es un paquete o software de simulación de tránsito para sistemas con semaforización o sin ella, para autopistas, vías con peaje, vías urbanas o sistemas combinados de autopistas y semaforización. Su principal fortaleza radica en la habilidad para simular las condiciones del tránsito con un nivel de detalle superior a otros programas de simulación disponibles. El TSIS, desarrollado por la Federal Highway Administration (FHWA) durante los últimos treinta años, ha evolucionado a la versión 5.1 y ha facilitado una mayor comprensión de la teoría de flujo

vehicular y de las operaciones de tránsito y transporte.

El ambiente de tránsito que solicita el modelo y que debe ser especificado por el usuario de los modelos de la familia TSIS consiste en:

- ◆ Topología del sistema de vías, calles y carreteras (en la forma de diagramas de enlace de nodos “red”).
- ◆ Geometría de cada uno de los componentes de la red.
- ◆ Canalización y disposición de los carriles, como giros a izquierda permitidos y carriles exclusivos de buses.
- ◆ Comportamiento de los conductores de manera que se configure el desempeño de los vehículos en los flujos del sistema, como aceleración, desaceleración y comportamiento en la fase semafórica de amarillo (fase de despeje).
- ◆ Dispositivos de control de tráfico, como señal de pare (stop), ceda el paso (yield), fases y tiempos de semáforos y detectores inductivos.
- ◆ Volúmenes e intensidades de tráfico que ingresan al sistema vial.
- ◆ Datos de origen y destino y trayectorias de los movimientos.

- ♦ Flota de automóviles o composición vehicular (buses, camiones y vehículos livianos).
- ♦ Especificaciones del sistema de transporte colectivo de pasajeros en buses (rutas, estaciones, paraderos, frecuencias y rotación del servicio).

Con el fin de proveer un marco eficiente de trabajo para definir las anteriores especificaciones, el ambiente físico se representa como una malla o red que comprende nodos (puntos) y enlaces o arcos “links” uni y bidireccionales según el caso. Estos últimos representan las vías urbanas o suburbanas, o tramos de sección de autopistas, mientras que los nodos representan intersecciones puntuales o aquellos sitios en los que hay cambios geométricos (como cambio de pendiente o algún polo generador o atractor de tráfico importante).

4.3.2.2 Beneficios y utilidades

El TSIS es un modelo que permite realizar análisis en diferentes categorías, acorde con las características del flujo de tránsito. Los análisis efectuados mediante el TSIS están relacionados con la red que representa el ambiente del tráfico. Ésta puede dividirse en subredes que interactúan entre sí. El usuario tiene absoluto control sobre esta partición y sus componentes para el análisis. Para la selección de subredes, se deben tener en cuenta varias consideraciones que incluyen las siguientes:

- ♦ El grado de detalle y precisión deseado para el estudio.
 - ♦ La Topología de la red.
 - ♦ Los niveles previstos de congestión vehicular.
 - ♦ El alcance de las operaciones de transporte público de pasajeros.
 - ♦ El nivel de detalle mínimo disponible.
- Entre las aplicaciones realizadas mediante el TSIS, se distinguen dos tipos de análisis importantes:

Análisis operacionales

Los análisis operacionales se encuentran enfocados a altos grados de análisis detallados, en los que se pueden evaluar cambios en las características de los dispositivos, de los volúmenes de tránsito y de las vías, como ciclos semafóricos, volúmenes de tránsito, sistemas de control, geometría, entre otros. Los análisis operacionales efectuados en el TSIS en la categoría operacional se resumen a continuación:

- ♦ Estudios para determinar el impacto de usos del suelo para estudios de administración del tránsito y accesibilidad.
- ♦ Análisis de autopistas elevadas, intersecciones a desnivel y vías urbanas o rurales a nivel.
- ♦ Programación de fases semafóricas y coordinación de semáforos en redes.
- ♦ Análisis para secciones de trenzado del tráfico, aumento o disminución de carriles de carreteras y vías.
- ♦ Localización y análisis de estaciones de bus o paraderos, rutas de buses, taxis y análisis de vehículos de alta ocupación.
- ♦ Rampas de intercambio en intersecciones y carriles exclusivos para alta ocupación.
- ♦ Intersecciones de prioridad o sin señalización.
- ♦ Detección de incidentes y gestión del tráfico.
- ♦ Estudios de colas con y sin retención.
- ♦ Teoría de formación de colas en general.
- ♦ Presentaciones públicas y demostraciones con animación secuencial en el tiempo a manera de video.

Análisis de asignación de tránsito

El programa CORSIM soporta el uso de modelos de simulación para asignación de tránsito a la red, pero no constituye el propio modelo de asignación. El modelo de asignación del TSIS interactúa con el componente NETSIM de CORSIM mediante técnicas convencionales de tránsito estático y de otras técnicas de optimización. El propósito de contar con modelo de asignación de tráfico es extender las capacidades potenciales de CORSIM para uso de planificadores e ingenieros de tránsito.

Para el planificador, éste usualmente dispone de suficiente información para ensamblar la matriz Origen/Destino de los volúmenes de tránsito que representa la demanda de transporte en determinada área durante un periodo específico. Dado que esta información es valiosa, el NETSIM la adopta transformándola específicamente en los porcentajes de giros en cada intersección, lo que constituye el modelo de asignación. Los principales análisis que se pueden realizar son:

- ◆ Tendencias de origen y destino de flujos de tránsito y asignación de tránsito en redes.
- ◆ Verificación y validación de otro software.
- ◆ Apoyo en la recolección información de datos de campo.

Los efectos de cada una de las alternativas detalladas en los respectivos análisis, como relocalización de paraderos y estaciones de buses de servicio público de pasajeros, restricciones de tránsito automotor, estacionamientos y zonas de parqueo, pueden estudiarse con este modelo. Estrategias un poco menos detalladas, como cambios de sentido vial, pueden ser analizadas con modelos macroscópicos, los cuales permiten calibrar

situaciones de impacto de las alternativas, incluso por fuera del área donde se están implementando.

4.3.2.3 Componentes del TSIS

El TSIS consta de un juego o familia de modelos debidamente integrados que representan el ambiente, condiciones o entorno de la corriente del tránsito (continua o discontinua). Cada uno de los componentes del TSIS está diseñado para representar un ambiente físico particular (calles, carreteras o autopistas) a un determinado nivel de detalle de simulación (macro y microscópico). En el caso de la simulación microscópica, se representan los movimientos individuales de cada vehículo, la cual incluye la influencia del comportamiento típico del conductor.

El TSIS es un sistema integrado compuesto por los siguientes submodelos:

- ◆ NETSIM: modelo microscópico de simulación del tráfico urbano basado en simulación estocástica.
- ◆ FRESIM: modelo estocástico microscópico de simulación de tráfico en condiciones de flujo libre.
- ◆ NETFLO 1 (nivel 1): modelo macroscópico detallado para la simulación del tráfico urbano.
- ◆ NETFLO 2 (nivel 2): modelo macroscópico de simulación para tráfico urbano en menor detalle.
- ◆ FREFLO: modelo macroscópico de simulación de tráfico sobre autopistas.

El TSIS y sus programas de soporte cuentan con interfaces en un sistema coherente e integrado con el NETSIM (Network Simulation-Simulación de redes urbanas a flujo discontinuo) y FRESIM (Freyway Simulation-Simulación de redes de autopistas a flujo continuo).

El sistema de nomenclatura de cada uno de los modelos se basa en una combinación de prefijos y sufijos. Los prefijos NET y FRE indican una red de tráfico vehicular a nivel (característico de flujos discontinuos), en el caso del primero, y de una autopista elevada (característico de flujos continuos) en el caso del segundo. Los sufijos SIM y FLO indican que se trata de modelos de simulación micro y macroscópica respectivamente. A su vez, la combinación de NETSIM y FRESIM se denomina CORSIM, de sus siglas en inglés (Corridor Microscopic Simulation)

El TSIS cuenta con cuatro programas de apoyo principales:

- ◆ TSHELL: interfaz gráfica en Windows del software que soporta la ejecución de varios programas y módulos de apoyo.
- ◆ TRAFED, comprende el módulo en el cual se realiza la creación de los juegos de datos necesarios para efectuar los análisis respectivos mediante el modelo.
- ◆ CORSIM: software que contiene los modelos NETSIM y el FRESIM. Realiza la comprobación de datos de entrada en cada tarjeta de registro y ejecuta el modelo de análisis.

- ◆ TRAFVU: software de visualización gráfica de resultados, que permite mostrar gráficamente los datos de salidas resultantes del modelo así como la propia simulación dinámica.

Como se mencionó, el TSIS es un programa que funciona en la plataforma Windows y que opera con menús para el acceso a los diferentes programas y módulos específicos, es decir, que desde el TSIS se puede acceder a TRAFED, al CORSIM y al TRAFVU al accionarlos mediante los accesos dispuestos para tal fin.

4.3.2.4 Operación del programa TSIS

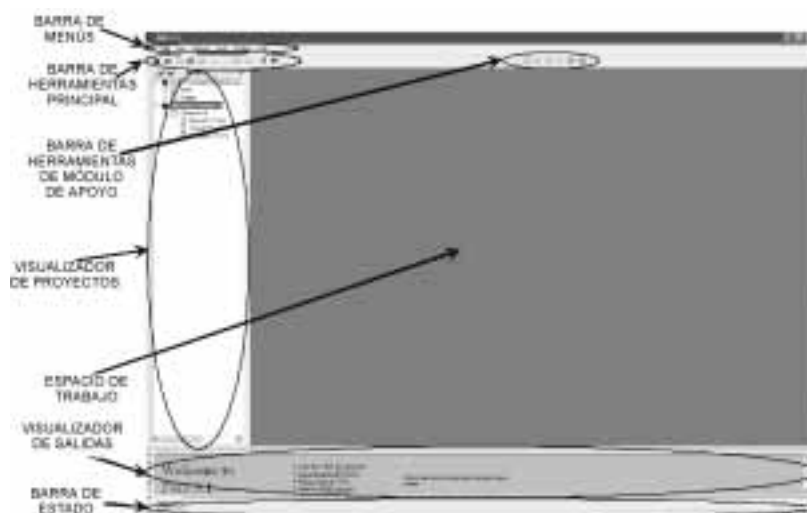
En esta sección se describen las características fundamentales del programa TSIS (Versión 5.1). El TSIS presenta los diversos módulos de apoyo visualizados por el usuario a través del uso de menús, como se presenta a continuación:

Menú principal del TSHELL

Para iniciar el TSHELL del sistema del TSIS, se debe entrar al subdirectorio donde se encuentra localizado. En la pantalla aparece el símbolo que identifica el programa TSIS. Seguidamente, al presionar la tecla izquierda del mouse sobre el icono, se muestra el menú principal presentado en la Figura 4.87.

En la Tabla 4.9 se presenta el resumen de posibilidades de la ba-

Figura 4.87
Menú principal
del TSHELL



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa TSIS
Versión 5.1

Menú principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo proyecto e iniciación de un nuevo archivo.
	Open	Abrir un archivo existente.
	Close	Cerrar el archivo existente.
	Open Project	Abrir un proyecto previo.
	Close Project	Se cierra un proyecto.
	Save	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Print	Imprime el contenido del documento activo en la impresora.
	Print Preview	Visualiza el contenido del documento activo de la pantalla como será impreso.
	Print Setup	Selección y conexión de la impresora.
	Recent Files List	Lista de los últimos cuatro archivos que fueron abiertos o grabados.
Exit	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del TShell.	
Edit	Undo	Deshacer la operación de edición previa.
	Redo	Rehacer la operación de edición realizada previamente.
	Cut	Borrado de los datos y almacenamiento en el bloc de notas.
	Copy	Copiado de datos en el bloc de notas.
	Paste	Pegado de datos del bloc de notas en el documento activo o localización específica.
	Delete	Permite borrar el texto seleccionado u objeto que se encuentre activo.
	Select All	Selecciona todos los elementos seleccionables del documento activo.
	Find	Permite encontrar un texto u objeto en el documento activo.
View	Full Screen Mode	Permite la visualización en pantalla completa o no del espacio de trabajo.
	Main Tool Bar	Permite la visualización o no de la barra principal.
	Traffic Tool Bar	Permite la visualización o no de la barra de tránsito.
	Simulation Control Bar	Permite la visualización o no de la barra de simulación y de sus comandos
	Project View	Permite la visualización o no del módulo de visualizador de proyectos.
	Output View	Permite la visualización o no del módulo de visualizador de salidas.
	Welcome Page	Permite la visualización o no de la página de bienvenida en el visualizador de salidas.
lpar	Status Bar	Permite la visualización o no de la barra de estado.
Options	Preferences	Permite la visualización del dialogo de preferencias del TShell.
	Project Description	Permite la visualización de la descripción del proyecto.
Tools Menu	Editors	Permite el acceso a las herramientas de edición.
	Simulation	Permite el acceso a las herramientas de simulación.
	Processors	Permite el acceso a las herramientas de procesamiento.
	Viewers	Permite el acceso a las herramientas de visualización.
	Scripts	Permite el acceso a las herramientas de programación.
	Tool Configuration	Permite el acceso a la configuración de herramientas.

Tabla 4.9
Barra de menús y submenús de los módulos del TShell

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa TSIS Versión 5.1

Tabla 4.9
(Continuación)
Barra de
menús y
submenús de
los módulos
del TSHELL

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa TSIS
Versión 5.1

Menú principal	Submenú	Función
Window	Cascade	Permite desplegar todas las ventanas activas con la barra de título disponible.
	Tile	Permite desplegar las ventanas activas en divisiones horizontales.
	Arrange Icons	Permite organizar las ventanas activas.
Help	Help Topics	Acceso a las ayudas de diferentes herramientas que se encuentran en línea.
	Tip of The Day	Se presenta la sugerencia del día sobre el TSIS.
	TSIS Web Site	Acceso al sitio web del TSIS.
	Report Problem	Reporte de problemas del software para ser enviado por FAX o por e-mail.
	About TSIS	Este comando muestra la información del TSIS en la que se incluye la versión, derechos de información e información de registro.

rra de menús y submenús de los módulos específicos del TSHELL.

Menú principal del TRAFED

El programa de apoyo TRAFED permite crear y modificar una red de tráfico. El programa de apoyo se basa en una interfaz gráfica. Una de las grandes ventajas del TRAFED consiste en permitir a los ingenieros la construcción y simulación de redes de tránsito para la toma de decisiones, que se guardan en un archivo de extensión TRF (*.trf). Éste se halla compuesto por 84 diferentes tipos de

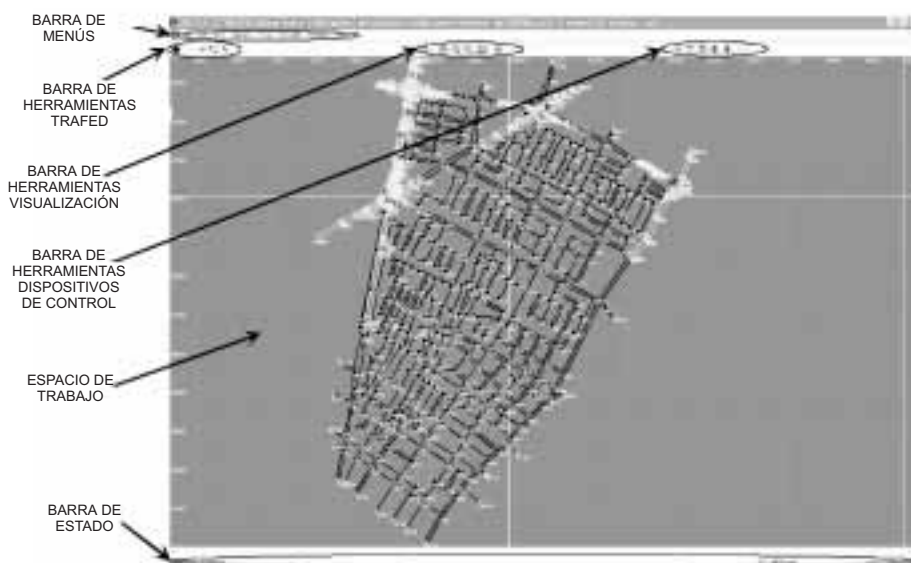
tarjetas grabadas, a las cuales pueden acceder diferentes personas en diferentes lugares. Las principales funciones del TRAFED se presentan a continuación:

- ♦ Creación de los objetos de un modelo de tránsito
- ♦ Entrar al modelo de tránsito
- ♦ Editar las propiedades de un objeto
- ♦ Mover objetos dentro de la ventana de la red
- ♦ Borrar objetos

En la Figura 4.88 se presenta la configuración principal del TRAFED.

Figura 4.88
Menú principal
del programa
TRAFED

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa TSIS
Versión 5.1



En la Tabla 4.10 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menús y submenús específicos del TRAFED.

En el TRAFED, se presentan las tres barras de herramientas para la creación y edición de los modelos de tránsito. En la Figura 4.89 se observan las tres barras de herramientas de acceso rápido en el TRAFED.

Los modelos de tránsito del TSIS se encuentran conformados por diferentes objetos. En términos generales, un modelo está conformado por enlaces, nodos, dispositivos de control y rutas de buses. Los enlaces y los nodos determinan la geometría de la red; los dispositivos de control y otros objetos afectan el volumen de tránsito a través de la red.

Los enlaces representan las vías de la red, las cuales se puede asociar una serie de propiedades, como el sentido de circulación (un sentido o dos sentidos); también se considera la pendiente, el tipo de pavimento, etc. Los enlaces se encuentran conectados mediante un solo nodo corriente arriba y un solo nodo corriente abajo. Éstos se encuentran representados como flechas entre los nodos. TRAFED distingue por medio de colores la superficie que se determina para el análisis de redes tipo NETSIM y para redes del tipo FRESIM. Los nodos, que son un punto de interés para la red vial, se clasifican en diversos tipos. Los de uso común son:

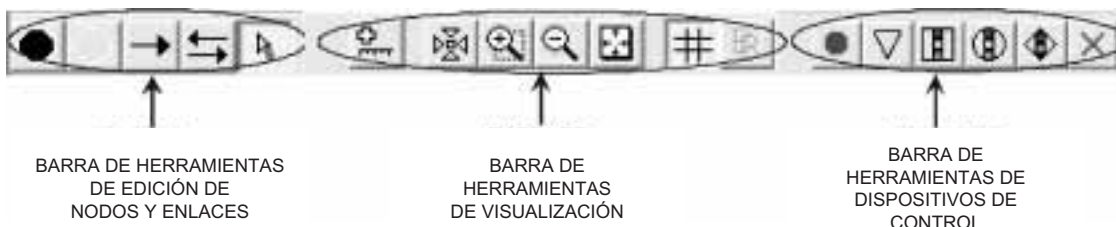
- ◆ Nodos de entrada, puntos donde entra el volumen de tránsito que se simulará en la red.

- ◆ Nodos de salida, puntos donde sale el volumen de tránsito que se simulará en la red.
- ◆ Nodos de vías urbanas: representa el cruce de vías. Por medio de un nodo, se tiene en cuenta dónde se cruza la superficie, dónde se presentan cambios en las vías.
- ◆ Nodos de autopistas: se presentan para definir las divergencias y convergencias en las autopistas.
- ◆ Nodos de intercambio: permiten la transición entre nodos de vías urbanas y vías de autopistas.

Menú Principal del CORSIM

El programa de apoyo CORSIM permite preparar la entrada, analizar la salida y ejecutar la simulación mediante el modelo de simulación CORSIM. Éste consta de dos modelos integrados de simulación que representan todo el entorno de la corriente del tránsito. El CORSIM permite simular diferentes subredes y aplica la variable de tiempo en la simulación para describir las operaciones de la corriente del tránsito. El intervalo de tiempo considerado es el segundo, es decir, que cada vehículo se define como un objeto que se mueve cada segundo. Cada variable de dispositivo de control y cada evento es actualizado cada segundo.

El CORSIM es un modelo estocástico que utiliza números aleatorios para cada vehículo y cada conductor para la toma de



BARRA DE HERRAMIENTAS DE EDICIÓN DE NODOS Y ENLACES

BARRA DE HERRAMIENTAS DE VISUALIZACIÓN

BARRA DE HERRAMIENTAS DE DISPOSITIVOS DE CONTROL

Figura 4.89
Barras de herramientas del TRAFED

Fuente:
Elaboración propia con base en el programa TSIS Versión 5.1

Tabla 4.10
Barra de
menús y
submenús de
los módulos
del TRAFED
(1)

Menú principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo proyecto e iniciación de un nuevo archivo.
	Open	Abrir un archivo existente.
	Close	Cerrar el archivo existente.
	Open Project	Abrir un proyecto previo.
	Close Project	Se cierra un proyecto.
	Save	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Print	Imprime el contenido del documento activo en la impresora.
	Print Preview	Visualiza el contenido del documento activo de la pantalla como será impreso.
	Print Setup	Selección y conexión de la impresora.
Edit	Recent Files List	Lista de los últimos cuatro archivos que fueron abiertos o grabados.
	Exit	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del TShell.
	Properties	Se permite entrar a las propiedades del objeto del modelo de tránsito.
	Undo	Deshacer la operación de edición previa.
	Redo	Rehacer la operación de edición realizada previamente.
View	Delete	Permite borrar el texto seleccionado u objeto que se encuentre activo.
	Find	Permite hacer búsquedas de objetos (enlaces, nodos y dispositivos de control). Igualmente, pueden hacerse búsquedas de la información por medio de los identificadores propios de cada objeto.
	Zoom In	Permite la ampliación de la escala del espacio de trabajo, ya sea colocando el mouse activo en la función y dando clic al botón izquierdo del mismo o realizando una ventana en el espacio de trabajo.
	Zoom Out	Permite la disminución de la escala del espacio de trabajo, ya sea colocando el mouse activo en la función y dando clic al botón izquierdo del mismo o realizando una ventana en el espacio de trabajo.
	Zoom In +	Realiza la misma acción del Zoom In, utilizando la tecla "+"
	Zoom In -	Realiza la misma acción del Zoom Out, utilizando la tecla "-"
	Pan	Permite movilizarse en la visualización actual del espacio de trabajo, sin que se varíe la escala del espacio de trabajo.
	Show Entire Network	Permite la visualización de toda la red, incluye el centrado y el cambio de escala dentro del espacio de trabajo que se ha definido.
	Grid	Permite la visualización o no de la grilla de la red.
	Node Numbers	Permite la visualización o no de los números de los nodos del modelo de tránsito.
	Bitmap Background	Permite la visualización o no de la imagen de la red ubicada detrás del modelo de tránsito.
	Distance Tool	Permite medir distancias en la red del modelo de tránsito
	Full Screen Mode	Permite la visualización en pantalla completa o no del espacio de trabajo.
Options	Status Bar	Permite la visualización o no de la barra de estado.
	Preferences	Permite la visualización del dialogo de preferencias del TShell.

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa TSIS
Versión 5.1

Menú principal	Submenú	Función
Tools Menu	Project Description	Permite la visualización de la descripción del proyecto.
	Editors	Permite el acceso a las herramientas de edición.
	Simulation	Permite el acceso a las herramientas de simulación.
	Processors	Permite el acceso a las herramientas de procesamiento.
	Viewers	Permite el acceso a las herramientas de visualización.
	Scripts	Permite el acceso a las herramientas de programación.
	Tool Configuration	Permite el acceso a la configuración de herramientas
Network	Check	Realiza la verificación interna del modelo de tránsito, al considerar un archivo temporal del tipo TRF, ejecutando internamente el modulo CORSIM, realiza únicamente la verificación de los datos de entrada.
	Export	Exporta el modelo de tránsito, de un archivo de red (*.tno) a un archivo (*.trf), realizando la validación del archivo de red y mostrando los errores que se deben hacer para realizar la exportación del archivo.
	Tool Palette	Permite la personalización de la entrada de los objetos del modelo de tránsito, definiendo los tipos de enlaces, nodos y dispositivos de control.
	Default Link type	Define el tipo de enlace que se desea crear.
	Load Bitmap	Permite hacer la carga de una imagen o foto aérea de la red vial de la cual se está haciendo el modelo de tránsito, permite tener un marco de referencia para la edición del modelo.
	Properties	Se definen propiedades de la red, como los periodos de tiempo considerados en la simulación, la descripción del modelo, reportes, dispositivos de control y tipos de vehículos entre otros aspectos.
	NETSIM Setup	Se define la configuración de parámetros del modelo NETSIM, considerando velocidades, cambios de carriles, peatones, duración de eventos de corta duración entre otros aspectos.
	FRESIM Setup	Se define la configuración de parámetros del modelo FRESIM, considerando coeficientes de fricción de superficies, cambios de carriles y velocidades entre otros aspectos.
	Bus Routes	Permite la entrada de rutas de buses, al definir el recorrido mediante la entrada de los nodos específicos y las paradas presentadas.
	Incident Detection	Permite la visualización de la detección de incidentes, el procesamiento puntual y la estimación de Medidas de Efectividad.
	Traffic Assignment	Se realiza la asignación del tránsito a la red vial de estudio mediante una función específica y una optimización escogida teniendo una tabla O-D definida para el modelo NETSIM
	Origin-Destination	Se definen los orígenes y destinos del modelo de tránsito del tipo FRESIM
	Link Aggregation	Permite realizar la agregación de enlaces en el modelo NETSIM.
	Interchanges	Permite realizar intercambios de enlaces en el modelo NETSIM.
	Preferences	Permite la visualización del dialogo de preferencias del TRAFED.
Window	Cascade	Permite desplegar todas las ventanas activas con la barra de título disponible.
	Tile	Permite desplegar las ventanas activas en divisiones horizontales.
	Arrange Icons	Permite tener la visualización de las ventanas activas.

Tabla 4.10
(Continuación)
Barra de menús y submenús de los módulos del TRAFED (1)

Fuente: Elaboración propia con base en el programa TSIS Versión 5.1

Tabla 4.10
(Continuación)
Barra de
menús y
submenús de
los módulos
del TRAFED
(1).

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa TSIS
Versión 5.1

Menú Principal	Submenú	Función
Help	TRAFED Help Topics	Acceso a las ayuda del TRAFED que se encuentran en línea.
	About TRAFED	Presenta en la pantalla de la versión del TRAFED.
	Help Topics	Acceso a las ayudas de diferentes herramientas que se encuentran en línea.
	Tip of The Day	Se presenta la sugerencia del día sobre el TSIS.
	TSIS Web Site	Acceso al sitio web del TSIS.
	Report Problem	Reporte de problemas presentados del Software para ser enviado por FAX o por e-mail.
	About TSIS	Este comando muestra la información del TSIS en la que se incluye la versión, derechos de información e información de registro.

decisiones, permitiendo la obtención de medidas de efectividad como resultado de un proceso específico de esos números. Con el fin de obtener mejores resultados en el proceso de simulación, se sugiere realizar éste con diferentes semillas de números aleatorios. Los resultados de la distribución de las medidas de efectividad obtenidas podrá determinar la mejor representación del funcionamiento de la red de tránsito.

El CORSIM acumula resultados cada intervalo de tiempo considerado. Al final de cada período, los datos almacenados se utilizan para producir las medidas de efectividad. Éstas pueden ser utilizadas en conjunto con los conceptos de capacidad y niveles de servicio para definir el funcionamiento de la red de tránsito. El CORSIM es capaz de simular gran capacidad de vías de flujo continuo, in-

cluidos múltiples carriles, vías principales, rampas de entrada y salida que conectan a otras vías, considerando variaciones de tránsito, pendientes, radios de curvatura, peraltes, adición y eliminación de carriles.

En la Figura 4.90 se presenta la configuración principal del CORSIM y las opciones principales de edición.

Menú Principal del TRAFVU

TRAFVU es otro programa para el procesamiento interactivo con gráficas. Está diseñado para mostrar los resultados de las simulaciones hechas con CORSIM de manera animada; TRAFVU proporciona un ambiente fácilmente manejable de ventanas para entrada y salida de datos por CORSIM.

Figura 4.90
Menú principal
del CORSIM

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa TSIS
Versión 5.1



Está diseñado para facilitar su compatibilidad y de transporte.

TRAFVU permite al usuario animar simultáneamente varias ventanas de la misma red o de diferentes redes en las mismas condiciones de tráfico. Permite un uso sencillo y amigable de muchas variables medibles y varios formatos de presentación, los cuales incluyen tablas, gráficas, diagramas de control y la propia animación. TRAFVU es adecuado para estudios de operaciones de tráfico, lo mismo que para presentaciones de análisis o estudios de situaciones “Antes y Después”.

TRAFVU permite al usuario visualizar la simulación de tráfico de las siguientes maneras:

- ◆ Ejecución de modelos antes y después de una manera simultánea en el tiempo.
- ◆ Simulaciones independientes de múltiples procesos.
- ◆ Animación en varias ventanas simultáneamente.
- ◆ Selección de la velocidad deseada para la animación de la simulación

- ◆ Ventanas especializadas para mostrar y analizar los resultados de control de operaciones.
- ◆ Gráficos lineales y tablas asociadas.
- ◆ Muestra de entrada y salida de resultados de medidas eficaces en cuanto a las estrategias de administración o gestión de tránsito.
- ◆ Facilita el desplazamiento por los planos de las vías y cuenta con capacidad de *zoom* para acercar o alejar las imágenes y observarlas en diferente escala.
- ◆ Al funcionar con ambiente Windows, cuenta con todas las ventajas y capacidades de éste, para copias, edición, etc.

En la Figura 4.91 se presenta la configuración principal del TRAFVU y las opciones principales de edición.

El programa TRAFVU permite realizar la animación dinámica de los resultados obtenidos del modelo de simulación mediante la barra de control de animación, en la cual se puede definir la secuencia de la animación, suspenderla o terminarla. De igual forma, es

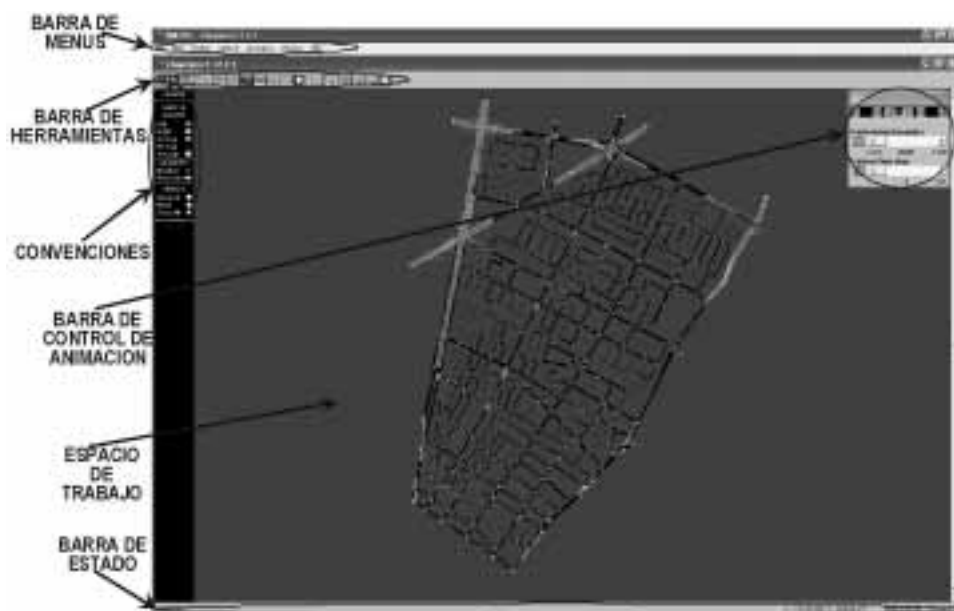


Figura 4.91
Menú principal
del TRAFVU

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa TSIS
Versión 5.1

posible visualizar en el modelo de simulación, las medidas de efectividad de acuerdo con el objeto del desarrollo del modelo.

4.3.3 Verkehr in Städten - Simulation (VISSIM)

El modelo VISSIM (Versión 3.70) es una herramienta de simulación microscópica, la cual modela el tráfico a nivel urbano y la operación del transporte público. El programa puede analizar diferentes condiciones del tráfico en diferentes condiciones de operación y analizar la operación de diferentes dispositivos de regulación del tráfico. Por tanto, es un programa que puede realizar análisis dinámicos.

El VISSIM es un paquete de simulación de tránsito que puede interactuar con sistemas de regulación del tránsito semaforizados, los cuales pueden ser actuados, semiaactuados o prefijados. Esto convierte esta herramienta en una de las más poderosas para el análisis dinámico entre la operación del flujo vehicular y la operación de los sistemas de regulación del tráfico. Este programa también simula la operación del tráfico en sistemas de señales de prioridad o sistemas a desnivel. La fortaleza del VISSIM radica en que puede realizar, como ya se mencionó, análisis dinámicos entre la operación vehicular y la operación de sistemas de regulación del tráfico, lo que presenta un componente que permite evaluar y analizar todas y cada una de las intersecciones semaforizadas que puedan presentarse en una red, como la interacción entre el flujo vehicular, los peatones y ciclistas. También es la primera herramienta que realiza la edición de los datos en un ambiente de dos dimensiones, y presenta los resultados en un ambiente gráfico de tres dimensiones. Puede generar estos archivos de tres dimensiones con obje-

tos dinámicos (autos, personas y bicicletas) y con objetos estáticos (edificaciones).

4.3.3.1 Alcances

El ambiente de tránsito que solicita el modelo y que debe ser especificado por el usuario consiste en:

- ◆ Topología del sistema de vías, calles y carreteras (en la forma de diagramas de enlace de nodos “red”).
- ◆ Geometría de cada uno de los componentes de la red.
- ◆ Canalización y disposición de los carriles tales como giros a izquierda permitidos, y carriles exclusivos de buses.
- ◆ Comportamiento de los conductores de manera que se configure el desempeño de los vehículos en los flujos del sistema, como aceleración, desaceleración y comportamiento en la fase semafórica de amarillo (fase de despeje).
- ◆ Dispositivos de control de tráfico, como señal de pare (stop), ceda el paso (yield), fases y tiempos de semáforos y detectores inductivos.
- ◆ Volúmenes e intensidades de tráfico que ingresan al sistema vial.
- ◆ Datos de origen y destino y trayectorias de los movimientos.
- ◆ Flota de automóviles o composición vehicular (buses, camiones y vehículos livianos).
- ◆ Especificaciones del sistema de transporte colectivo de pasajeros en buses (rutas, estaciones, paraderos, frecuencias y rotación del servicio).
- ◆ Configuración de las características propias de cada vehículo que intervenga en la operación (largo, ancho). De igual manera, se permite introducir las características de las bicicletas y de los peatones.

Para proveer un marco eficiente de trabajo y definir las anteriores especificaciones, el ambiente físico se representa como una malla o red que comprende nodos (puntos), enlaces o arcos “links” uni y bidireccionales, según el caso, y conectores. Los enlaces o arcos representan las vías urbanas, mientras que los nodos representan aquellos sitios en los que hay cambios geométricos (como cambio de pendiente o algún polo generador o atractor de tráfico importante), los conectores representan las intersecciones o enlaces, ya sean de prioridad, ceda el paso o semaforizada.

4.3.3.2 Beneficios y utilidades

El VISSIM es un modelo que permite realizar análisis en diferentes categorías, acorde con las características del flujo de tránsito. Los análisis efectuados mediante este software se encuentran relacionados con la red que representa el ambiente del tráfico, que interactúan entre sí. El usuario tiene absoluto control sobre sus componentes para el análisis.

Entre las aplicaciones que realiza el VISSIM, se distinguen dos tipos de análisis importantes:

Análisis operacional

Los análisis operacionales se encuentran enfocados a altos grados de análisis detallados donde se pueden evaluar cambios en las características de los dispositivos, de los volúmenes de tránsito y de las vías, como ciclos semafóricos, volúmenes de tránsito, sistemas de control y geometría. Los análisis operacionales realizados en el VISSIM en dicha categoría se resumen a continuación:

- ◆ Estudios para determinar el impacto de usos del suelo para estudios de administración del tránsito y accesibilidad.
- ◆ Análisis de intersecciones a desnivel y vías urbanas a nivel.
- ◆ Programación de fases semafóricas y coordinación de semáforos en redes.
- ◆ Análisis para secciones de trenzado del tráfico aumento o disminución de carriles de vías.
- ◆ Localización y análisis de estaciones de bus o paraderos, rutas de buses y análisis de vehículos de alta ocupación.
- ◆ Rampas de intercambio en intersecciones y carriles exclusivos para alta ocupación.
- ◆ Intersecciones de prioridad o sin señalización.
- ◆ Detección de incidentes y gestión del tráfico.
- ◆ Estudios de colas con y sin retención.
- ◆ Teoría de formación de colas en general.
- ◆ Presentaciones públicas y demostraciones con animación secuencial en el tiempo a manera de video.

Análisis de asignación de tránsito

En el módulo de simulación dinámico, el programa VISSIM soporta el uso de modelos de simulación para asignación de tránsito a la red, constituyendo de alguna manera el propio modelo de asignación. El modelo de asignación del VISSIM interactúa con el componente de simulación del flujo vehicular dada su condición de modelo dinámico. El propósito de contar con un modelo de asignación de tráfico es analizar en tiempo real las condiciones existentes en la red.

El planificador usualmente dispone de suficiente información para ensamblar la matriz Origen/Destino de los volúmenes de tránsito que representa la demanda de transporte en determinada área durante un período.

do específico. Dado que esta información es valiosa, el VISSIM la adopta transformándola en estudio mediante análisis dinámico de las redes. Los principales análisis que se pueden realizar son:

- ◆ Análisis dinámico de origen y destino de flujos de tránsito y asignación de tránsito en redes.
- ◆ Verificación y validación de otro software.
- ◆ Apoyo en la recolección información de datos de campo.

Los efectos de cada una de las alternativas detalladas en los respectivos análisis, como relocalización de paraderos y estaciones de buses de servicio público de pasajeros, restricciones de tránsito automotor, estacionamientos y zonas de parqueo, pueden ser estudiados con este modelo. Algunas estrategias, como cambios de sentido vial, pueden analizarse con modelos macroscópicos, los cuales permiten calibrar situaciones de impacto de las alternativas, incluso por fuera del área donde se están implementando.

4.3.3.3 Componentes del VISSIM

El VISSIM consta de dos componentes básicos: el componente de simulación del flujo vehicular, donde se realiza todo el análisis sobre el flujo vehicular y se definen las características de todos los elementos que intervienen en dicho análisis; y el modelo dinámico de simulación, donde se define la asignación del tráfico y se realiza la interacción entre el componente del flujo vehicular y la componente de análisis de las intersecciones semaforizadas, principalmente. El programa de simulación se puede basar en análisis realizados con programas como el PRESYNCHRO o el WINTeAPAC, los cuales forman parte del TEAPAC. Éste

último es la herramienta en que se basa el modelo de simulación dinámico para analizar los tiempos de los semáforos y la optimización de los mismos.

El VISSIM es un sistema integrado, compuesto por los siguientes submodelos de apoyo:

- ◆ **MODELO DE SIMULACIÓN DEL TRÁFICO.** Modelo microscópico de simulación del tráfico urbano basado en simulación estocástica.
- ◆ **MODELO DINÁMICO DE SIMULACIÓN Y ASIGNACIÓN DEL TRÁFICO.** Modelo macroscópico de simulación de tráfico urbano, basado en las condiciones que genera el modelo de simulación de tráfico.
- ◆ **TEAPAC.** Modelo microscópico de simulación de redes de intersecciones semaforizadas que puede determinar el tiempo óptimo de verde en intersecciones reguladas por semáforo. Este análisis se efectúa de manera coordinada en dichas redes y presenta dos opciones: el manejo del programa propio del TEAPAC, denominado PRESYNCHRO, desde donde se realiza el análisis de todas las intersecciones que alimentan la red de proyecto; y el WINTeAPAC, que permite la alimentación de las redes semaforizadas desde un programa alternativo que realice dicha simulación, como TRANSYT, HCS o SYNCHRO.

4.3.3.4 Operación del Programa VISSIM

En esta sección se describen las características fundamentales del programa VISSIM (Versión 3.70). El VISSIM presenta los diversos módulos de apoyo, visualizados por el usuario a través de menús.

Menú Principal del VISSIM

Para iniciar el VISSIM, se debe entrar al subdirectorio donde se encuentra localizado. En la pantalla aparece el símbolo que identifica el programa VISSIM. Seguidamente, al presionar la tecla izquierda del mouse sobre el icono, aparece el menú principal que muestra en la Figura 4.92.

En la Tabla 4.11 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menús y submenús del VISSIM.

El VISSIM tiene una barra de herramientas asociada a la creación y edición de los modelos de simulación del flujo vehicular y de los modelos de simulación dinámica que se encuentran en la visualización principal del VISSIM. En la Figura 4.93 se observa la barra de herramienta de acceso rápido en el VISSIM.

En el menú principal del VISSIM, es posible realizar la definición de los aspectos básicos que se deben tener en cuenta en el modelo, así como aspectos de importancia de la red vial y de la red de transporte público, y la definición de parámetros básicos de la simulación del usuario, de la visualiza-

ción y de la simulación que se puede realizar, definiendo el número de simulaciones que se van a analizar y de semillas (números aleatorios de eventos) que se deben considerar para producir los resultados de la evaluación.

El VISSIM permite generar archivos de salida específicos de acuerdo con lo que el usuario defina. En la Figura 4.94 se presentan las opciones que se pueden incluir en el archivo de salida que se genera desde el VISSIM. Igualmente, el VISSIM permite generar las salidas mediante bases de datos, las cuales pueden considerar software de la familia Microsoft, como Access 97 o Access 2000/XP.

Los principales resultados incluyen, entre otros:

- ◆ Tiempos de viaje
- ◆ Tiempos de demora
- ◆ Colección de información
- ◆ Colas
- ◆ Tiempos y distribución de verdes
- ◆ Información de vehículos
- ◆ Planes de semaforización dinámicos
- ◆ Información de detectores de semáforos

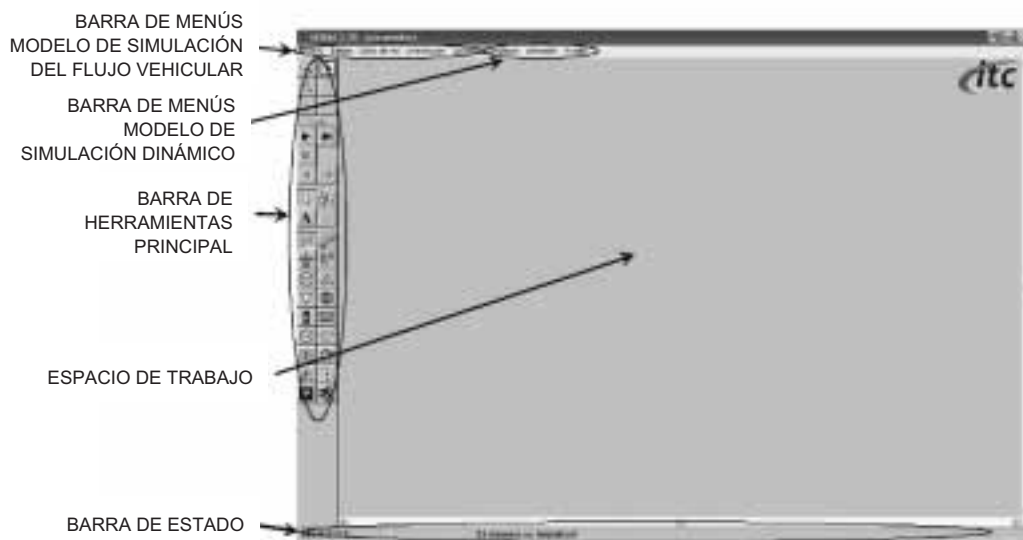


Figura 4.92
Menú principal
del VISSIM

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa VISSIM
Versión 3.70

Tabla 4.11
Barra de
menús y
submenús del
VISSIM

Menú principal	Submenú	Función
Archivo	Nuevo	Creación de un nuevo proyecto e inicio de un nuevo archivo.
	Abrir	Abrir un archivo existente.
	Guardar	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Guardar como	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Importar	Importa archivos TEAPAC y SYNCHRO.
	Exportar	Exporta archivos VISUM.
	Imprimir	Imprime el contenido del documento activo en la impresora.
	Configurar página	Visualiza el contenido del documento activo de la pantalla como será impreso.
	Salir	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del VISSIM.
Edición	Acerca de	Da información acerca del programa y remite al usuario a una pagina de Internet.
	Borrar	Borra lo seleccionado previamente.
Editor de Red	Partir enlace	Parte un enlace que ya está creado.
	Tipos de vehículo	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar el tipo de vehículo, bicicleta y peatón del proyecto.
	Clases de vehículos	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar y crear el tipo de vehículo, bicicleta y peatón que se necesite en el proyecto.
	Tipos de enlace	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar el tipo de enlace del proyecto: urbano motorizado, ciclovía, vía peatonal.
	Distribuciones	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar las características de los usuarios de la red de proyecto. Velocidad deseada, año, modelo, kilometraje, peso, potencia, temperatura, tiempo de espera.
	Funktionen	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar las características de velocidad de los usuarios de la red.
	Composición del tráfico	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar la composición del tráfico: vehículos livianos, pesados, bicicletas y peatones.
	Selección	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar la red de proyecto. Enlaces, conectores de enlaces, accesos de entrada, ruta y decisión de dirección.
	Selección límites	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar la red de proyecto.
	Selección de ruta	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar la red de proyecto.
	Puesto de medición del tráfico	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar las características del puesto de medición del tráfico.
	Mediciones de demora	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar las características de la medición de la demora en la red.
	Rotar la red	Permite la visualización del diálogo de preferencias para rotar la red de proyecto.
	Mover la red	Permite la visualización del diálogo de preferencias para mover la red de proyecto.

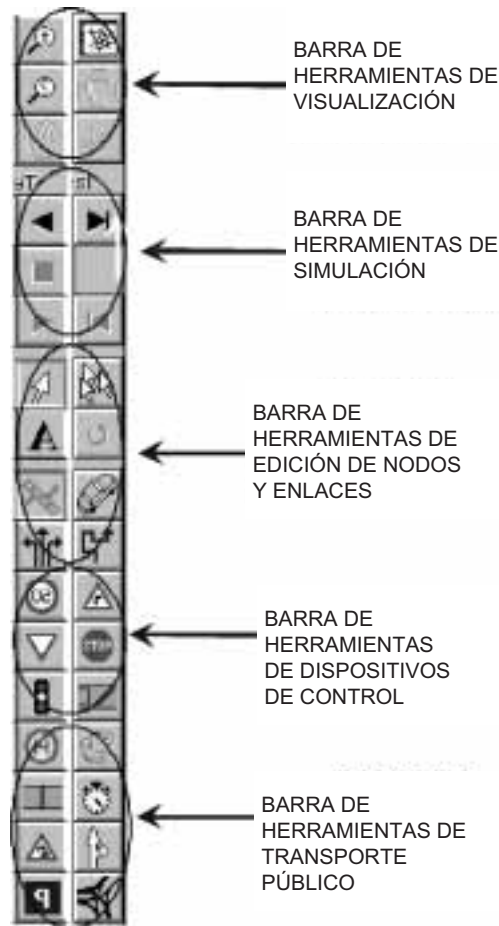
Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa VISSIM
Versión 3.70

Menú principal	Submenú	Función
Intersección	Editar Señales	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar los tipos de señales de la red.
	Comunicación entre Cruces	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar los tipos de comunicación existente entre los cruces de la red de proyecto.
Opciones	Presentación	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar la presentación del área de trabajo.
	Unidades	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar el sistema de unidades en el cual se desee trabajar el proyecto.
	Fondo	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar el área de presentación, e insertar imágenes en formato BMP.
	Evaluaciones	Permite la visualización del cuadro de diálogo de preferencias para editar los archivos a evaluar y las ventanas.
	Compatibilidad	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar los bloqueos que requiera la red de proyecto.
	Leer	Permite la visualización del diálogo de preferencias para abrir preferencias guardadas con anterioridad y que le sirvan para el presente proyecto.
	Guardar como	Permite la visualización del diálogo de preferencias para guardar el archivo de opciones en una ruta específica y con un nombre específico.
Simulación	Parámetros	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar los parámetros iniciales de la simulación. Período de simulación, hora de inicio.
	Conducta de manejo	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar la conducta de manejo de los conductores que se presentan en la red de proyecto.
	Movimientos vehiculares	Permite la visualización del diálogo de preferencia para llamar archivos que relacionen los movimientos vehiculares que se presenten en la red de proyecto.
	Asignación dinámica	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar el proceso de asignación del tráfico de la red de proyecto.
	Emisiones	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar los parámetros de medición de emisiones de la red de proyecto.
	Paso a paso	Permite iniciar la ejecución paso a paso de la simulación de la red de proyecto.
	Parar	Permite ejecutar una parada cuando está en ejecución el proceso de simulación de la red de proyecto.
Animación	Parámetros	Permite la visualización del diálogo de preferencias para editar los parámetros iniciales y realizar la animación de la simulación de la red de proyecto. Tiempo de grabación de la simulación, selección del archivo de animación.
	Paso a paso	Permite iniciar la ejecución paso a paso de la animación de la simulación de la red de proyecto.
	Grabar	Permite guardar de forma segura, en una ruta especificada, la animación realizada de la red de proyecto.
Prueba	Paso a paso	Permite iniciar la ejecución paso a paso de una prueba de la simulación y la animación de la red de proyecto.
	Macro	Permite la visualización del diálogo de preferencias para abrir macros realizadas con anterioridad para la simulación y animación de la red de proyecto

Tabla 4.11
(Continuación)
Barra de menús
y submenús del
VISSIM

Fuente: Elaboración propia con base en el programa VISSIM Versión 3.70

Figura 4.93
Barras de
herramientas
del Programa
VISSIM



Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa VISSIM
Versión 3.70

- ◆ Cambios en los semáforos
- ◆ Evaluación a incluir por enlace
- ◆ Evaluación a incluir por nodo
- ◆ Evaluación de funcionamiento de la red o arteria
- ◆ Cambios de carriles
- ◆ Entradas de vehículos
- ◆ Diagramas espacio vs. tiempo
- ◆ Diagrama velocidad vs. distancia
- ◆ Estadísticas de aceleración
- ◆ Evaluación integral de aceleración y velocidad
- ◆ Estadísticas de emisión
- ◆ Exportación

- ◆ Evaluaciones especiales
- ◆ Rutas

Menú principal del TEAPAC

El programa de apoyo para la simulación y optimización de intersecciones semaforizadas TEAPAC (Traffic Engineering Application PACKage), permite realizar la optimización de intersecciones semaforizadas, de manera coordinada, del mismo modo que TRANSYT, SYNCHRO, HCS y CORSIM, lo cual le permite recrear la red de proyecto y analizar la red de manera dinámica.

En la Figura 4.95 se presenta la configuración principal del paquete de simulación TEAPAC, que presenta como eje principal el PRESYNCHRO (PRE y POST PROCESADOR para manipulación de redes del modelo SYNCHRO) y el módulo winTEAPAC, el cual permite la generación de archivos desde otros programas que realicen optimizaciones de redes semaforicas. Se observa la composición del mismo, al considerar las diferentes barras para el manejo y manipulación de archivos en el espacio de trabajo.

En la Tabla 4.12 se presenta el resumen de posibilidades de la barra de menús y submenús específicos del módulo específico del PRESYNCHRO.

EL PRESYNCHRO es una herramienta que permite manipular datos del modelo SYNCHRO y preparar datos de entrada y de importación de los datos del modelo SYNCHRO en el formato UTDF.

Entre las alternativas que presenta el paquete WinTEAPAC está el módulo de apoyo WinTEAPAC, una interfaz que permite, a diferencia del PRESYNCHRO, interactuar con todos los programas que presenten caracte-

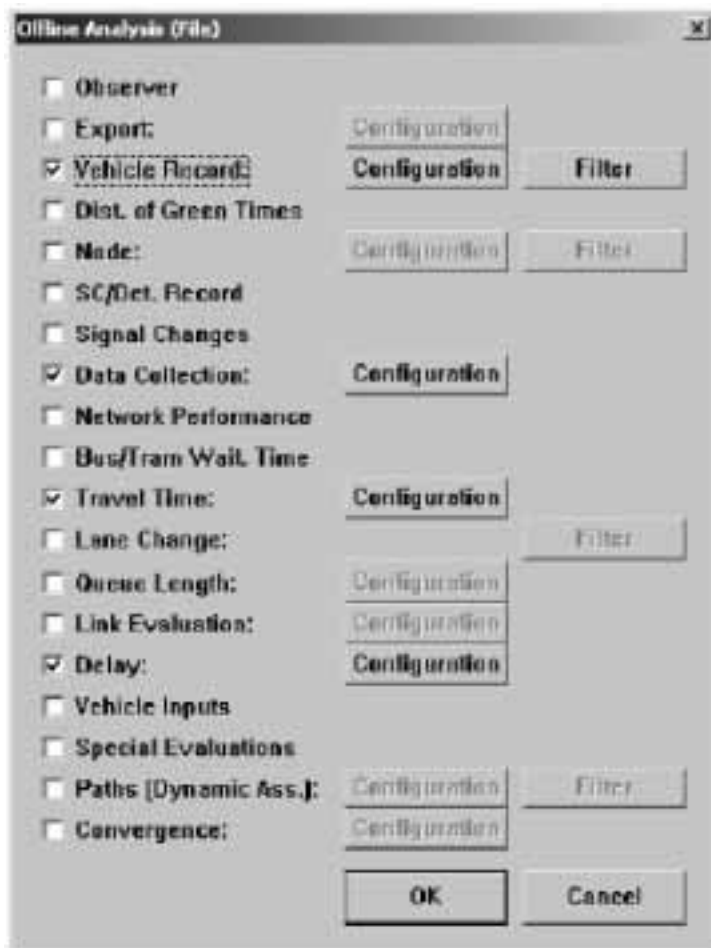


Figura 4.94
Menú principal
de los archivos
de salida del
VISSIM

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa VISSIM
Versión 3.70

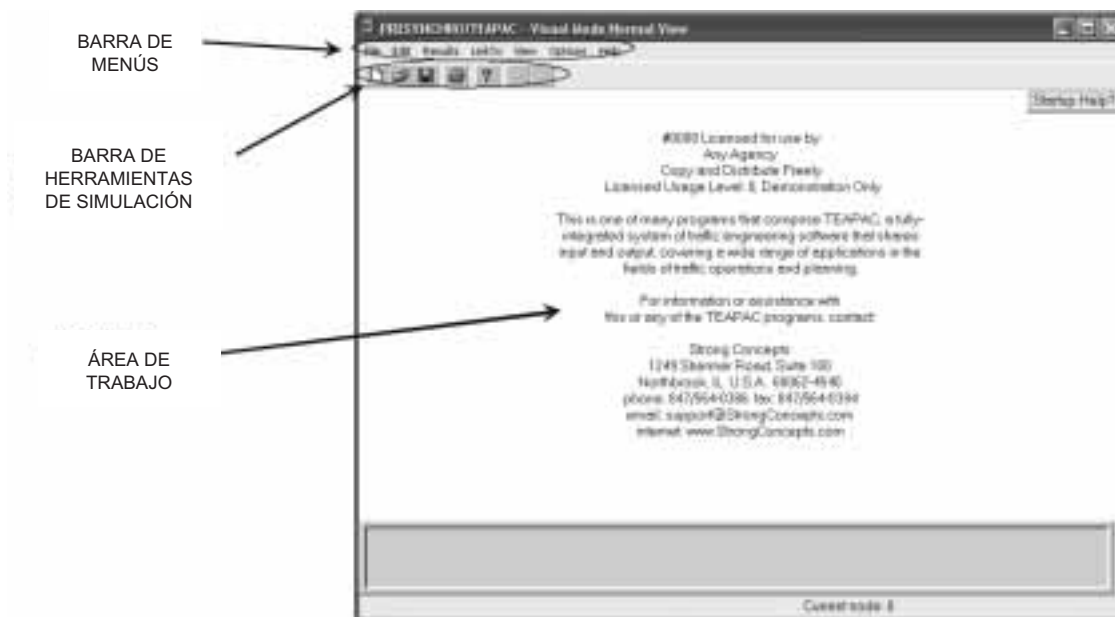


Figura 4.95
Menú principal
del paquete
TEAPAC
Programa
PRESYNCHRO

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa VISSIM
Versión 3.70

Tabla 4.12
Barra de menús
y submenús de
los módulos del
PRESYNCHRO

Menú Principal	Submenú	Función
File	New	Creación de un nuevo proyecto e inicialización de un nuevo archivo.
	Open	Abrir un archivo existente.
	Open Shared	Abrir un archivo compartido.
	Close	Cerrar el archivo existente.
	Save	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre designado actualmente.
	Save as	Grabar un archivo abierto utilizando el nombre específico nuevo.
	Print Setup	Selección de impresora y conexión de la impresora.
	Setup and Print	Selección de impresora y conexión de la impresora.
	Print	Selección de parámetros de impresión.
Edit	Exit	Cierre de todas las ventanas abiertas y salida del PRESYNCHRO.
	Titles	Permite la visualización del dialogo de preferencias para editar el nombre del proyecto, la descripción y agregar algunas notas.
	Basic	Permite la visualización del dialogo de preferencias para editar los nodos, realizar la optimización, editar la red, los volúmenes, la geometría y los parámetros del flujo vehicular.
	System	Permite la visualización del dialogo de preferencias para editar la lista de nodos, los nodos maestros, la simulación, el modelo de análisis de colas y la optimización.
	Intersection	Permite la visualización del dialogo de preferencias para editar la localización de los nodos, la red, los volúmenes y la geometría.
Results	Signal2000	Permite la visualización del dialogo de preferencias para editar los parámetros que se desean evaluar en la simulación, nivel de servicio, tipo de llegada, cola inicial, etc.
	Export	Permite exportar archivos del presynchro, a un programa compatible como el synchro.
	Import	Permite importar archivos desde programas similares como el Transyt, y convertirlos en archivos de Presynchro.
	Plot	Permite realizar la impresión por pantalla de los resultados de la simulación.
Linkto	Timings	Permite visualizar los tiempos óptimos de los semáforos, de toda la red.
	Signal2000	Permite realizar la conversión de una red a signal2000
	Pretspdp	Permite realizar la conversión de una red a Pretspdp
	Prepassr	Permite realizar la conversión de una red a Prepasar
	Pretransyt	Permite realizar la conversión de una red a Pretransyt
	Prenetsim	Permite realizar la conversión de una red a Prenetsim
View	Presynchro	Permite realizar la conversión de una red a Presynchro
	Network	Permite la visualización de la red de proyecto.
	Summary	Permite la visualización del resumen de los resultados de la simulación.
	Last Output	Permite la visualización de la última salida que se ejecutó.

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa VISSIM
Versión 3.70

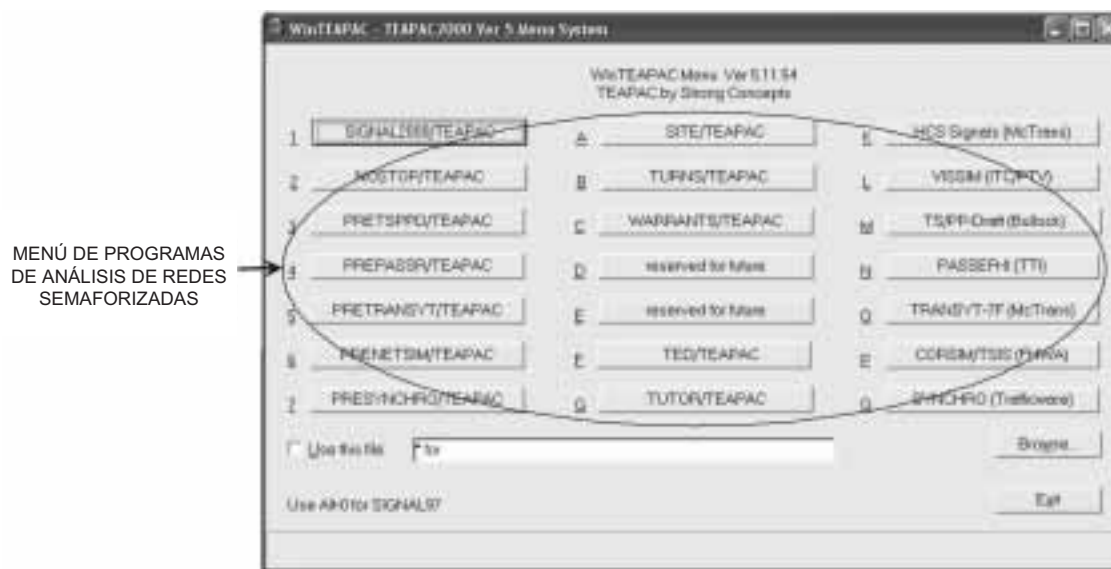


Figura 4.96
Menú principal
del paquete
TEAPAC
WinTEAPAC

Fuente:
Elaboración propia
con base en el
programa VISSIM
Versión 3.70

rísticas de análisis de redes semaforicas. En la Figura 4.96, se presenta la configuración del WinTEAPAC.

Como se puede ver, la interacción que permite el WinTEAPAC involucra todos los posibles modelos de análisis de intersecciones semaforizados, los cuales deben estar ubicados en el directorio principal del WinTEAPAC. Por consiguiente, se debe realizar la instalación correspondiente antes de utilizar este modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Level Of service Handbook. Florida Department of Transportation. Systems Planning Office, 1998.
- Traffic Engineering. Second Edition. William R. McShane; Roger P. Roess; Elena S. Prassas: Prentice Hall, 1998.

Highway Capacity Software HCS 2000. Versión 4.1e. McTrans Center, University of Florida, 2004.

Signalised & Unsignalised Intersection Design and Reserch AID, aaSIDRA 2.0. User Guide. Akcelik & Associates Pty Ltd, February, 2002.

Traffic Network Study Tool, TRANSYT-7F. United States Versión. Release 10, Mc TRANS Center University of Florida, 2005.

Traffic Software Integrated System TSIS 5.1. User's Guide. ITT Industries, INC. Systems Division, 2003.

Traffic Signal Coordination Software SYNCHRO. Versión 5.0. User Guide for Windows. Trafficware Corporation, 2001.

Verkehr In Städten - Simulation (VISSIM) Versión 3.7. User Manual. Planung Transport Verkehr AG, Enero de 2003.

LISA+ 3.1 Manuel, Schlothauer & Partner.

5

Estudios de Tránsito para Tránsito Vehicular

CONTENIDO

5.1	VOLÚMENES DE TRÁNSITO EN TRAMOS VIALES	5-5
5.1.1	Planeación	5-5
5.1.2	Ejecución	5-6
5.1.3	Presentación de datos de campo	5-7
5.2	VOLÚMENES DE TRÁNSITO DIRECCIONALES	5-7
5.2.1	Planeación	5-8
5.2.2	Ejecución	5-11
5.2.3	Presentación de datos de campo	5-12
5.3	VOLÚMENES DE TRÁNSITO EN ESTACIONES MAESTRAS	5-12
5.3.1	Planeación	5-13
5.3.2	Ejecución	5-13
5.3.3	Presentación de resultados	5-13
5.4	VELOCIDAD PUNTUAL	5-13
5.4.1	Planeación	5-14
5.4.2	Ejecución	5-16
5.4.3	Presentación de datos de campo	5-18
5.5	TIEMPO DE RECORRIDO POR EL MÉTODO DEL VEHÍCULO EN MOVIMIENTO	5-20
5.5.1	Planeación	5-21
5.5.2	Ejecución	5-24
5.5.3	Presentación de datos	5-28
5.6	TIEMPO DE RECORRIDO POR EL MÉTODO DE LAS PLACAS DE MATRÍCULA	5-29
5.6.1	Planeación	5-29
5.6.2	Ejecución	5-30
5.6.3	Presentación de datos	5-32
5.7	TIEMPO DE DETENCIÓN EN INTERSECCIONES CONTROLADAS POR SEMÁFORO	5-32
5.7.1	Planeación	5-33
5.7.2	Ejecución	5-35
5.7.3	Procesamiento y obtención de resultados	5-36
5.8	OCUPACIÓN VEHICULAR	5-38
5.8.1	Planeación	5-38
5.8.2	Ejecución	5-40
5.8.3	Presentación de resultados	5-40
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5-41

FIGURAS

Figura 5.1	Estudios de campo sobre el tránsito vehicular	5-6
Figura 5.2	Campos para la presentación de datos en el conteo de volúmenes	5-7
Figura 5.3	Nomenclatura para los movimientos vehiculares en una intersección	5-8
Figura 5.4	Nomenclatura para los movimientos peatonales y de ciclorruta en una intersección	5-10
Figura 5.5	Estudio de volúmenes direccionales. Formato de campo	5-11
Figura 5.6	Campos para la presentación de datos en el conteo de volúmenes direccionales	5-13
Figura 5.7	Presentación de datos de una estación maestra	5-14
Figura 5.8	Medidores de velocidad a base de radar	5-15
Figura 5.9	Velocidades puntuales con cronómetro o con radar. Formato de campo	5-17
Figura 5.10	Ángulo de incidencia, ϕ , entre la trayectoria y la visual del radar del vehículo	5-18
Figura 5.11	Presentación de datos de velocidad, mediante dos puntos de referencia	5-19
Figura 5.12	Velocidades (km/h) calculadas a partir de tiempos (segundos) medidos con cronómetro	5-19
Figura 5.13	Histogramas de velocidades puntuales	5-20
Figura 5.14	Curva de distribución acumulativa de las velocidades puntuales	5-20
Figura 5.15	Tiempos de recorrido y demoras. Formato de campo	5-25
Figura 5.16	Tiempos de recorrido y demoras. Vehículo flotante	5-26
Figura 5.17	Resumen datos y resultados de la información de campo	5-30
Figura 5.18	Tiempos de recorrido. Método de las placas de matrícula. Formato de campo	5-31
Figura 5.19	Presentación de datos para tiempos de recorrido por medio de placas de matrícula	5-31
Figura 5.20	Detención en intersecciones controladas por semáforo. Formato de campo	5-34
Figura 5.21	Estudio de ocupación vehicular. Formato de campo	5-39
Figura 5.22	Presentación de resultados para la ocupación visual	5-40

TABLAS

Tabla 5.1	Codificación de los movimientos vehiculares en una intersección	5-9
Tabla 5.2	Codificación de los movimientos peatonales y de ciclorruta en una intersección	5-10
Tabla 5.3	Longitudes de base recomendadas de acuerdo con la ecuación 5.1 (m)	5-16
Tabla 5.4	Muestras para estudios de tiempo de recorrido - nivel de confianza de 95%	5-23
Tabla 5.5	Factor de corrección para demoras por aceleración – desaceleración	5-38

El presente capítulo contiene cuatro componentes específicos: volúmenes de tránsito, velocidad puntual, tiempo de recorrido y de detención, y ocupación vehicular.

La información obtenida a través de los estudios de volúmenes de tránsito son aplicables en el planeamiento, en los proyectos, en ingeniería de tránsito y en la investigación.

El conocimiento de la velocidad representa un parámetro destacado en la determinación de elementos del diseño vial y en la regulación del tránsito.

Con el fin de ilustrar los estudios de campo contenidos en el presente capítulo, a continuación se muestra la distribución de acuerdo con el componente correspondiente.

5.1 VOLÚMENES DE TRÁNSITO EN TRAMOS VIALES

La determinación de los volúmenes vehiculares forma parte de la información básica para el estudio y análisis de las condiciones del tránsito en corredores viales urbanos. Por esta razón su cuantificación constituye una de las principales medidas en cualquier estudio de tránsito y transporte; de ahí que las recomendaciones presentadas a continuación se orienten fundamentalmente a las actividades de recolección.

- ◆ Es fundamental que el ingeniero a cargo de la planeación y ejecución del estudio conozca y se familiarice con los corredores viales que quiere analizar, realizando visitas de campo, visualizando la geometría del corredor, los volúmenes y la composición por tipo de vehículo.
- ◆ Con base en las visitas realizadas, se determinan los sitios específicos sobre los cuales se tomará la información, realizando esquemas específicos en los cuales se registran aspectos de relevancia para definir correctamente la programación del personal de campo.
- ◆ Cada movimiento que realizan los vehículos debe ser codificado con las recomendaciones de este manual.
- ◆ La duración y los períodos de conteo dependen de la orientación que requieran los estudios a ejecutar. Usualmente la información se recopila dentro de los períodos pico, durante dos días típicos consecutivos, martes a jueves y/o un día atípico de una semana cualquiera.

5.1.1 Planeación

En primera instancia se recomienda realizar una visita al sitio donde se va a efectuar la medición con el fin de elaborar un esquema del punto con su geometría general y los

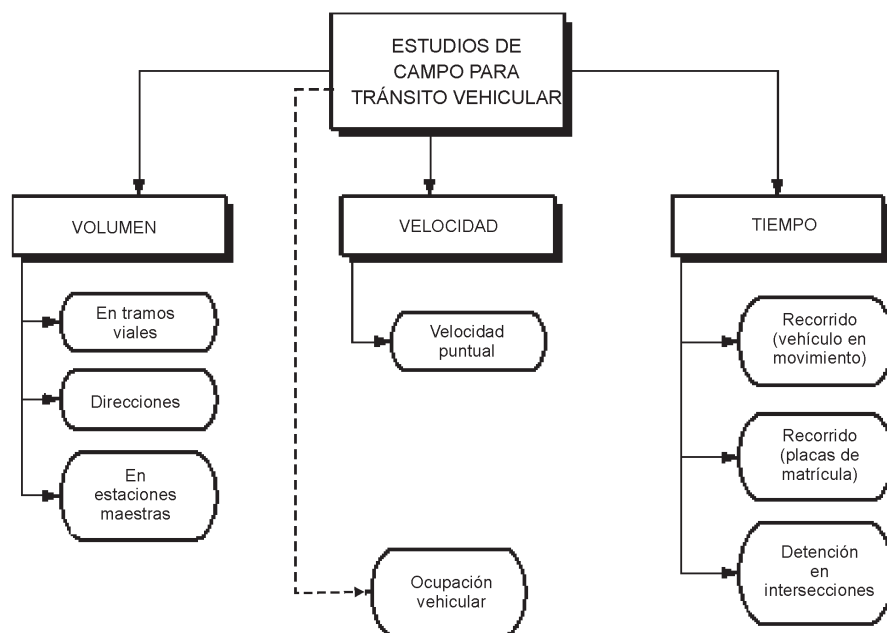


Figura 5.1
Estudios de
campo sobre el
tránsito
vehicular

Fuente:
elaboración
propia

movimientos vehiculares. Además, se debe visualizar la magnitud del tránsito por movimiento y composición vehicular con el fin de determinar el personal requerido y su ubicación estratégica para facilitar la toma de datos.

Se recomienda realizar los estudios de campo preferiblemente con estudiantes universitarios de carreras afines, a los cuales se les puede explicar más en detalle el alcance de los estudios y la importancia que la información de campo corresponda efectivamente a la realidad para infundirles responsabilidad y compromiso en el trabajo de campo.

De acuerdo con el equipo disponible, se puede utilizar uno de los siguientes métodos de conteo: el mecánico (registro automático) y el manual.

La asignación de los aforadores se realiza de acuerdo con la estimación de los volúmenes, la composición vehicular que se espera registrar la duración de los períodos de conteo. En condiciones de tráfico ideales, un aforador está en capacidad de registrar la

información de un acceso de tres carriles, discriminándola por tipo de vehículo y movimiento realizado durante períodos no mayores a tres horas y descansos de cinco minutos cada hora.

5.1.2 Ejecución

La información de campo se registra en períodos de 15 minutos, clasificándolos de acuerdo con el tipo de movimiento y el tipo de vehículo (auto, bus, camión, moto, bicicleta y de tracción animal) a medida que van fluyendo por el punto de referencia.

Dependiendo de la magnitud del tránsito, los registros se realizan en forma individual anotando “palitos” para cada vehículo, si el volumen es bajo; o contando en forma continua para anotar al final del verde, cuando los movimientos son fuertes.

Si el estudio lo amerita, los vehículos de transporte público se pueden clasificar según la modalidad de transporte: bus corriente, bus alimentador, busetón, bus ejecutivo, bus

corriente corto, bus corriente largo, buseta, microbús grande, microbús pequeño, trans-milenio o bus articulado. De igual forma, los camiones se pueden clasificar según el número de ejes: camiones C2, C3, C4, C5 y >C5, según tengan dos, tres, cuatro, cinco o más de cinco ejes, respectivamente.

Es importante resaltar que para llevar a cabo el estudio, los observadores deben estar en el sitio de trabajo por lo menos 30 minutos antes de iniciar los estudios de campo con el propósito de diligenciar completamente el encabezado de los formatos a utilizar y ocupar la ubicación definida por el supervisor de campo.

5.1.3 Presentación de datos de campo

La presentación de los datos dependerá de si éstos forman parte de la descripción en un informe o si se anexan como validación de la información analizada en un estudio de tránsito. En el primer caso se presentan generalmente los valores que de la medición determinan la hora de mayor volumen, acompañados de histogramas o gráficas tipo “torta” que permiten comprender mejor la información que se expone. En el segundo caso, anexar la información a un estudio de tránsito, se deberá realizar de manera que permita su verificación tanto en un listado como en un medio digital. Para ello se recomienda presen-

tar dicha información en una matriz, de tal manera que en cada columna se condense determinado tipo de información y en cada fila se registre el dato del intervalo de tiempo seleccionado. Esta presentación generalmente se deberá entregar en una hoja de cálculo, que permita su alimentación a cualquier sistema destinado a conformar una base de datos tal como a continuación se indica.

5.2 VOLÚMENES DE TRÁNSITO DIRECCIONALES

Los conteos para determinar volúmenes de tránsito direccionales se realizan en intersecciones viales, tanto para intersecciones controladas con semáforo como para aquellas que no lo están (como intersecciones a desnivel). Es usual solicitar un estudio de este tipo para intersecciones que serán controladas con el dispositivo regulador.

Los volúmenes se deberán llevar a cabo, registrando de acuerdo a su clasificación, dirección o sentido del flujo vehicular, movimiento, es decir, directo, giro a derecha y giro a izquierda y por tipo de vehículo, o sea, automóvil, bus, camión, moto, bicicleta, vehículo de tracción animal, entre otros, según sea el caso particular requerido por el estudio.

El registro de la información en las salidas se emplea únicamente en intersecciones controladas por semáforo, de manera que

Figura 5.2
Campos para la presentación de datos en el conteo de volúmenes

Fuente:
elaboración propia



siempre se consigna la información de un único movimiento, dependiendo de la programación de las fases de los semáforos.

5.2.1 Planeación

En primera instancia se recomienda realizar una visita al sitio donde se va a efectuar la medición con el fin de elaborar un esquema de la intersección con su geometría general, los movimientos vehiculares y el diagrama de fases (si la intersección es controlada por semáforo, se relaciona la secuencia de los diferentes movimientos). También se debe visualizar la magnitud del tránsito por movimiento y composición vehicular con el fin de determinar el personal requerido y su ubicación estratégica para facilitar la toma de datos.

Es fundamental que el profesional a cargo de la planeación y ejecución del estudio, conozca y se familiarice con los corredores viales que quiere analizar, realizando visitas de campo necesarias para visualizar los sistemas de control del tránsito, la geometría del corredor, los volúmenes aproximados con su composición por tipo de vehículo y los movimientos vehiculares, permitidos o no, entre otras variables.

En la Figura 5.3 se presenta la codificación de los movimientos vehiculares aplicados para la ciudad de Bogotá. En el caso de las vías de doble calzada, donde se permita el giro en U, se empleará el código 10 acompañado del número referido al acceso, como se indica en la Tabla 5.1.

De igual forma y de acuerdo con la codificación para flujos vehiculares, se tiene una codificación para los flujos peatonales y de ciclorruta, los cuales se ilustran en la Figura 5.4 y en la Tabla 5.2.

Se recomienda que los estudios de campo se realicen de igual modo que para el caso de volúmenes de arribos, preferiblemente con estudiantes universitarios de carreras afines, a los cuales se les puede explicar más en detalle el alcance de los estudios y la importancia que la información de campo corresponda efectivamente a la realidad con el fin de infundirles responsabilidad y compromiso con el trabajo de campo.

De acuerdo con el equipo disponible, se puede utilizar uno de los siguientes métodos de conteo: el mecánico (registro automático) y el manual.

La asignación de los aforadores se realiza de acuerdo con la estimación de los volúmenes, la composición vehicular que se espera registrar y la duración de los períodos de conteo. En condiciones de tráfico ideales, un aforador está en capacidad de registrar la información de un acceso de tres carriles,

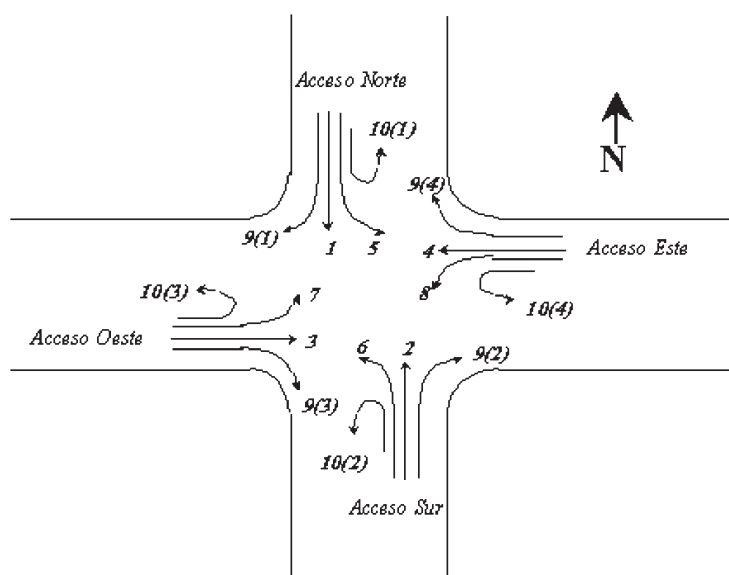


Figura 5.3
Nomenclatura
para los
movimientos
vehiculares en
una
intersección

Fuente:
elaboración
propia.

discriminándola por tipo de vehículo y movimiento realizado, durante períodos no mayores a tres horas y descansos de cinco minutos cada hora.

Además de los anteriores, se creó un nuevo grupo semafórico que describe el conflicto presentado con el paso peatonal al realizar maniobras de giro (izquierdo o derecho). Este grupo se indica mediante una flecha intermitente de color amarillo para indicar al conductor la precaución que debe tener al realizar la maniobra de giro. Para nombrar este grupo, se debe anteponer al grupo principal del cual proviene el vehículo el número 6; luego para denotar el giro procedente del acceso norte, se llamará el grupo 61.

Tabla 5.1
Codificación de los movimientos vehiculares en una intersección

Acceso	Movimiento	Código
Norte	Directo	1
	Giro a izquierda	5
	Giro a derecha	9(1)
	Giro en U	10(1)
Sur	Directo	2
	Giro a izquierda	6
	Giro a derecha	9(2)
	Giro en U	10(2)
Occidental	Directo	3
	Giro a izquierda	7
	Giro a derecha	9(3)
	Giro en U	10(3)
Oriental	Directo	4
	Giro a izquierda	8
	Giro a derecha	9(4)
	Giro en U	10(4)

Fuente:
elaboración propia

Para diferenciar grupos paralelos, como ocurre en vías de doble calzada y un solo sentido de circulación, el grupo se indicará según corresponda a tráfico lento o rápido, o incluso se podrá denotar adicionando al grupo una letra que se asignará en orden alfabé-

tico de la calzada derecha hacia la izquierda del acceso.

Formato para el registro de los volúmenes vehiculares direccionales

El formato de campo empleado para la toma de campo de los volúmenes vehiculares se presenta en la Figura 5.5. En la segunda parte del formato, se solicita la siguiente información general:

- ◆ Fecha: día, mes y año en el cual se registra la información de campo.
- ◆ Condiciones climáticas: condiciones climáticas que existen en la intersección (soleado, nublado o lluvioso).
- ◆ Encuestador: nombre de la persona encargada de tomar la información.
- ◆ Hora inicial: hora de comienzo correspondiente al formato que se diligencia. Es decir, cada formato tiene su propia hora inicial.
- ◆ Hora final: hora de terminación correspondiente al formato que en ese momento se diligencia. Es decir, cada formato tiene su propia hora final.
- ◆ Intersección: nombre o la dirección de la intersección en estudio.
- ◆ Supervisor: nombre de la persona encargada de la supervisión del trabajo de campo.
- ◆ Hoja No. ____ de ____ : número de la hoja que se está empleando, y el número total de las hojas que se van a emplear.

En la tercera parte del formato, aparece un cuadro cuyas columnas representan la siguiente información:

- ◆ Movimiento No. ____: anotar el número de los movimientos asignados (uno por cada línea) de acuerdo con la codificación de los movimientos definida anteriormente.

Acceso	Movimiento	Despeje	Acceso contrario
Norte	Transversal peatonal	21	31
	Directo ciclorruta	41	-
Sur	Transversal peatonal	22	32
	Directo ciclorruta	42	-
Occidente	Transversal peatonal	23	33
	Directo ciclorruta	43	-
Oriente	Transversal peatonal	24	34
	Directo ciclorruta	44	-

Tabla 5.2
Codificación de los movimientos peatonales y de ciclorruta en una intersección

Fuente:
elaboración propia.

- ♦ **Período:** corresponde al período de 15 minutos durante el cual se registra la información de campo. Por ejemplo: 7:00 a.m. – 7:15 a.m.
- ♦ **Tipo de vehículo:** los vehículos se han clasificado de la siguiente manera:
 - Autos: todos los vehículos livianos (de cuatro ruedas).
 - Buses: incluyen los diferentes tipos de buses y busetas.
 - Camiones: todos los vehículos de carga de más de cuatro ruedas, según clasificación del Ministerio de Transporte.
 - Motos

Vale la pena anotar que dependiendo del estudio a desarrollar, sus objetivos y su ubicación, se puede adaptar la clasificación de vehículos incluyendo otro tipo de vehículos; por ejemplo, bicicletas, transporte de trac-

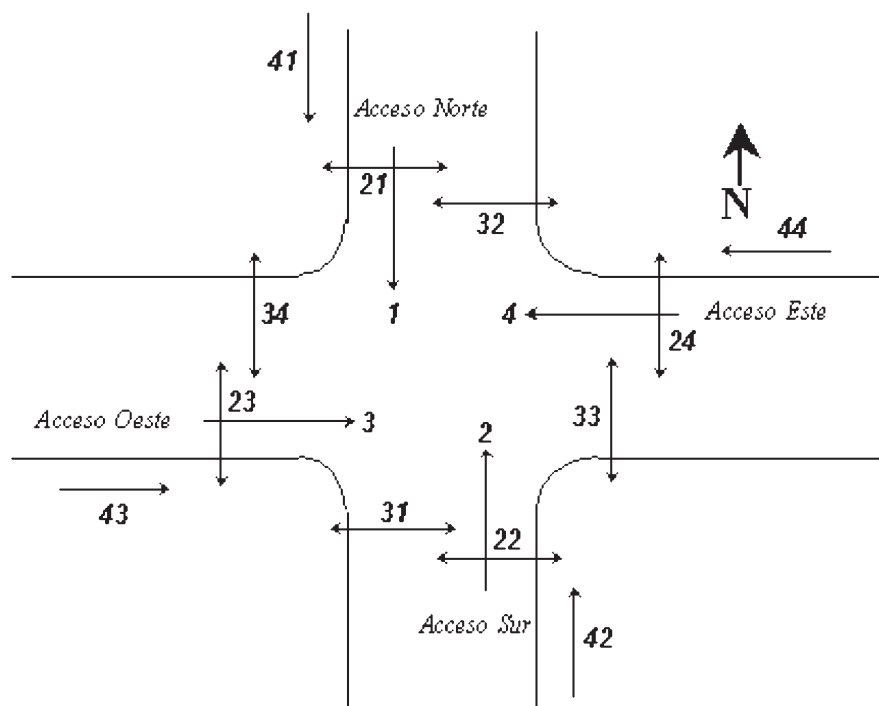


Figura 5.4
Nomenclatura para los movimientos peatonales y de ciclorruta en una intersección

Fuente:
elaboración propia

si el volumen es bajo; o contando en forma continua para anotar al final del verde, cuando los movimientos son fuertes.

Además, si el estudio lo amerita, los vehículos de transporte público se pueden clasificar según la modalidad de transporte: bus alimentador, busetón, bus ejecutivo, bus corriente corto, bus corriente largo, buseta, microbús grande, microbús pequeño y bus articulado o Transmilenio. De igual forma, los camiones se pueden clasificar según el número de ejes así: camiones C2, C3, C4, C5 y >C5, según tengan dos, tres, cuatro cinco o más de cinco ejes, respectivamente.

Es importante resaltar que para llevar a cabo el estudio, los observadores deben estar en el sitio de trabajo por lo menos 30 minutos antes de iniciar los estudios de campo con el propósito de diligenciar completamente el encabezado de los formatos a utilizar y ocupar la ubicación definida por el supervisor de campo.

Como algunos de los estudios de volúmenes se encaminan a mejorar las condiciones de operación del semáforo, el volumen a medir debe representar efectivamente el valor correspondiente al cual debe servir el tiempo de la fase del semáforo. En tal sentido, el aforador se debe ubicar al final de la cola o en un punto tal que el paso de los vehículos sea prácticamente a flujo libre y no justo en las inmediaciones del despeje del acceso, pues en ese momento estaría midiendo el volumen que la programación del tiempo de verde permite evacuar en dicho acceso.

5.2.3 Presentación de datos de campo

La presentación de los datos dependerá, como en el caso de los volúmenes de tránsito en tramos viales, de si éstos forman parte de la descripción en un informe o si se anexan

como validación de la información analizada un estudio de tránsito. En el primer caso se presentan generalmente los valores que de la medición determinan la hora de mayor volumen (valores pico), acompañados de histogramas o gráficas tipo “torta” que permiten comprender mejor la información que se expone. En el segundo caso, la anexión de la información a un estudio de tránsito se deberá realizar de manera que permita su verificación tanto en un listado como en un medio digital. Se recomienda presentar dicha información en una matriz, de manera que en cada columna se condense determinado tipo de información y en cada fila se registre el dato del intervalo de tiempo seleccionado. Esta presentación generalmente se deberá entregar en una hoja de cálculo que permita alimentar cualquier sistema destinado a conformar una base de datos como se indica en la Figura 5.6.

Acompañado de esta información es imperativo presentar un esquema de la intersección aforada, donde se puedan ver claramente los accesos y movimientos aforados. En la presentación digital de esta información dicho esquema se debe incluir en una hoja de cálculo.

5.3 VOLÚMENES DE TRÁNSITO EN ESTACIONES MAESTRAS

El objetivo del registro de tránsito en estaciones maestras es determinar la variación del tránsito a través del tiempo, durante un período corto, mediano o largo, dependiendo de las necesidades y disponibilidades de equipos tecnológicos que realizan conteos permanentes para estimar, con base en dichas variaciones del tránsito, los volúmenes que transitan en tramos de avenidas o intersecciones destinadas a estaciones maestras.

5.3.1 Planeación

En esta fase se considera que las recomendaciones para el levantamiento de este tipo de información corresponden también a las expuestas para el registro de volúmenes de tránsito en intersecciones, descritas en el numeral 5.2.1, a excepción del formato de campo para volúmenes direccionales, ya que no se requiere ese nivel de detalle de acuerdo con lo que se persigue.

5.2.2 Ejecución

Previo al trabajo de campo, es importante definir, con base en un plano de la ciudad o del área en estudio, las intersecciones o sitios más representativos, escogidos como estaciones maestras.

Si la idea es conformar un sistema que permita obtener información permanente del comportamiento del tránsito, es indispensable disponer o instalar contadores automáticos que proporcionan información sobre número de ejes, volúmenes vehiculares, ocupación vehicular y velocidades, entre otras variables. En este caso se denomina una estación maestra permanente.

En las estaciones maestras permanentes la información se obtiene a través de los detectores automáticos. En el caso de las estaciones maestras de tipo temporal, la información se puede obtener en forma manual o con contadores portátiles.

5.3.3 Presentación de resultados

La presentación de los datos de una estación maestra se realizará de manera similar a lo indicado para volúmenes direccionales, determinando fecha, nombre o ubicación de la estación, la nomenclatura que describe el movimiento, el período de conteo y la clasificación vehicular. De esta manera, puede desglosarse por vehículos particulares o de transporte público.

Así mismo, será necesario presentar un esquema que describa los movimientos que conforman la estación maestra medida.

En la Figura 5.7 se presenta la base de datos para una estación maestra.

5.4 VELOCIDAD PUNTUAL

En un sistema vial, las velocidades pueden determinarse de manera puntual o generalizada en tramos o sectores específicos de un corredor en estudio. La selección del método para establecer las velocidades depende de si los resultados que se persiguen están orientados o no a un análisis puntual.

El objetivo inmediato de este manual es describir medios sencillos para obtener información sobre velocidades y tiempos de recorridos que permitan determinar la calidad del servicio que ofrecen sus vías, así como identificar y cuantificar las deficiencias del sistema vial para que éstas puedan ser anali-

Figura 5.6
Campos para la presentación de datos en el conteo de volúmenes direccionales

Fuente:
elaboración propia





Figura 5.7
Presentación de
datos de una
estación maestra

Fuente:
elaboración propia

zadas debidamente. También el manual está destinado a informar al usuario sobre la existencia de instrumentos y técnicas avanzadas que puedan hacer más eficiente la adquisición de esa información.

El objetivo secundario es brindar al ingeniero de tránsito los medios para conocer información básica sobre la velocidad que necesita para diseñar las medidas efectivas para regular el tránsito con el fin de mejorar la seguridad y movilidad.

5.4.1 Planeación

Cuando se miden velocidades puntuales, no interesa la velocidad de los vehículos que se observan específicamente, sino la velocidad representativa del total de vehículos que pasaron por un punto y que van a pasar mientras las condiciones no cambien significativamente, es decir, de la población de vehículos.

Se recomienda tomar el tamaño muestral aplicando la teoría general, pero se debe planear para obtener un número de observaciones mínimo práctico, correspondiente al 85% del volumen de vehículos que pasan por el sitio.

La mejor manera de determinar la velocidad puntual en una vía cualquiera es el empleo de medidores de radar. Este método permite obtener la lectura directa en campo. Sin embargo, si no se dispone de este tipo de

instrumentos, el enoscopio proporciona los datos de tiempo necesarios para calcular las velocidades. Una variación de este método consiste en el empleo de dos observadores en lugar de uno, de manera que el primero que encuentra la corriente del tráfico indica al segundo observador, mediante una señal, el instante en que el eje delantero del vehículo a registrar pasa en su marca. El segundo observador tiene que percatarse de la señal y de cuál es el vehículo objetivo de la medición. En ese momento acciona el cronómetro, el cual detendrá en el instante en que el eje delantero pase por su marca, registrando el tiempo medido en segundos.

Los medidores de velocidad a base de radar son los instrumentos más empleados actualmente para determinar velocidades puntuales. Se basan en el principio fundamental de que una onda de radio reflejada por un objeto en movimiento experimenta una variación en su frecuencia que es función de la velocidad del objeto, lo que se conoce como principio Doppler. Midiendo el cambio de frecuencia es posible determinar la velocidad del objeto que la refleja. En la actualidad, procedimientos que aplican técnicas infrarrojas y de láser para la medida directa de la velocidad están cobrando también mucha aceptación.

También se dispone de los detectores de paso de rueda temporales, de los cuales los más usados son las mangueras o tubos de

caucho. Son también los más económicos pero, de acuerdo con Arrimadas (1997, p. 2-7), no resultan efectivos en medio urbano, tanto por las pisadas simultáneas de varios vehículos sobre el tubo como por su incapacidad para medir a bajas velocidades o en lugares donde los vehículos paran con frecuencia. Otros detectores temporales de paso de rueda más efectivos (y más caros) son las cintas de contacto, para velocidades muy bajas; los piezorresistentes, para velocidades medias y bajas; y los piezoeléctricos, para velocidades muy altas. Estos dos últimos se usan también en instalaciones permanentes.

Los detectores de presencia más usados (Arrimadas, 1997, p. 2-10) son los de lazo inductivo, que pueden empotrarse en el pavimento como instalación permanente o fijarse a esteras de caucho para colocarlos sobre el pavimento y quitarlos con facilidad en instalaciones temporales. También se han combinado detectores de lazo fijos con cintas de contacto portátiles. En muchas de estas instalaciones donde se usan pares de detectores, se pueden obtener no sólo las velocidades puntuales de los vehículos, sino también su longitud, intervalo en tiempo entre vehículos y su separación. También es posible estimar aproximadamente la velocidad de los vehícu-

los con un solo detector, determinando el tiempo que tarda el vehículo en pasar sobre el detector y suponiendo una longitud de vehículo promedio, o por otros métodos indirectos como el que emplean los detectores basados en la imagen magnética del vehículo contra el campo magnético terrestre (Arrimadas, 1997, p. 2-32).

Las técnicas filmicas de video con reloj integrado tienen ventajas inherentes como: (1) registro permanente de lo que se observa, (2) captación de todos los vehículos (3) extracción de la información con los recursos y comodidades de la oficina y (4) observación y registro de varios sucesos que ocurran simultáneamente, inclusive los imprevistos.

Entre sus desventajas se pueden citar: (1) necesidad de encontrar un sitio apropiado para colocar la filmadora, (2) acceso al sitio apropiado, (3) lentitud de la extracción de los datos y (4) mayor probabilidad que se cometan equivocaciones, si se compara con la captación por instrumentos registradores; aunque se pueden corregir las equivocaciones si se identifican.

La longitud apropiada de la base para medir velocidades depende principalmente del grado de precisión deseado, la velocidad máxima de los vehículos que se observan y la

Figura 5.8
Medidores de
velocidad
a base de radar



Fuente:
www.decaturradar.com

apreciación del tiempo de recorrido. Esta apreciación la determina principalmente el instrumento que se use y la pericia del observador.

El error de apreciación máximo del tiempo de recorrido de la base es lógicamente la mitad de la apreciación del mismo; es decir, que si la apreciación es un segundo, el error de apreciación máximo sería medio segundo, positivo o negativo. Este error no debe ser mayor que el error de inferencia tolerable máximo de la media de la velocidad estimada. Como los errores de apreciación pueden ser por defecto o por exceso, se compensan hasta cierto punto, por lo que no es descabellado suponer que el error de la media sea igual al error de las observaciones individuales dividido entre la raíz cuadrada del número de observaciones. Basándose en las suposiciones hechas, se puede determinar matemáticamente la longitud de la base que produciría un error de apreciación en la velocidad media igual al error tolerable máximo de esa media por inferencia. La ecuación determinada es:

$$L = \frac{aV(1-k\sqrt{n})}{7.2k\sqrt{n}} \quad 5.1$$

donde,

L = longitud de la base (m).

a = apreciación del tiempo de recorrido (s).

V = velocidad puntual media esperada (km/h)

k = error máximo tolerable de la velocidad como proporción (tanto por uno) de ésta

n = número de observaciones

En condiciones ordinarias, Box y Oppenlander (1985, p. 87) recomiendan que se usen bases mínimas de 25 m para velocidades menores de 40 km/h, de 50 m para velocidades entre 40 y 65 km/h, y de 75 m para velocidades más altas.

En el caso de las mediciones con elementos detectores y registradores, bases de dos o tres metros producen resultados aceptables porque se aprecia la velocidad con gran exactitud y se observa un gran número de vehículos, lo que reduce considerablemente el error por apreciación de la media de las velocidades.

La Figura 5.9 presenta la hoja de campo que puede usarse para el procedimiento con cronómetro y enoscopio o con el de medidor de radar.

5.4.2 Ejecución

Al usar las técnicas filmicas hay que medir en el terreno distancias entre puntos que se perciban en la filmación para establecer una o más "bases" donde se puedan medir los tiempos de recorrido. Estos tiempos se digitan directamente en un computador de escritorio.

Con el desarrollo de instrumentos registradores cada vez más eficaces, el uso de las técnicas fotográficas va cayendo en desuso, pero hay muchos detalles que escapan a los instrumentos registradores, como accidentes o vehículos varados, que sí captan las técnicas fotográficas. Lo ideal es usar ambas técnicas simultáneamente. Además, las técnicas

Velocidad (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100
Longitud de base (m)	25	30	40	45	50	60	70	80

Tabla 5.3
Longitudes de base recomendadas de acuerdo con la ecuación 5.1 (m)

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.9
Velocidades
puntuales con
cronómetro o
con radar.
Formato de
campo

VELOCIDAD PUNTUAL											
Fecha: (D.M.A.)			Hora Inicio:		Localización:			Hoja:			
Día:			Hora Final:					De:			
Condición climática			Longitud Base (si se usó):			Sentido:					
			Estado del pavimento:			Procedimiento:					
No.	Lectura ¹ [S] - [KPH]	Tipo de vehículo ²	No.	Lectura ¹ [S] - [KPH]	Tipo de vehículo ²	No.	Lectura ¹ [S] - [KPH]	Tipo de vehículo ²	No.	Lectura ¹ [S] - [KPH]	Tipo de vehículo ²
1			26			51			76		
2			27			52			77		
3			28			53			78		
4			29			54			79		
5			30			55			80		
6			31			56			81		
7			32			57			82		
8			33			58			83		
9			34			59			84		
10			35			60			85		
11			36			61			86		
12			37			62			87		
13			38			63			88		
14			39			64			89		
15			40			65			90		
16			41			66			91		
17			42			67			92		
18			43			68			93		
19			44			69			94		
20			45			70			95		
21			46			71			96		
22			47			72			97		
23			48			73			98		
24			49			74			99		
25			50			75			100		

Notas:

¹ Depende de si se miden tiempos de recorrido o velocidades (empleando cronómetro o radar respectivamente).

² L = Automóviles a flujo libre; B = Bus o buseta a flujo restringido; BL = Bus o buseta a flujo libre; C = Camión a flujo restringido; CL = Camión a flujo libre; si se trata de un automóvil a flujo restringido, no se registra nada.

Constituyen un "pelotón" los vehículos que se siguen a corta distancia. En él se mide solamente la velocidad del que lo encabeza.

Observaciones:			
LOGO CONTRATANTE	NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE		NOMBRE DEL ESTUDIO
NOMBRE:		NOMBRE:	
FIRMA:		FIRMA:	
CARGO:		CARGO:	
FECHA:		FECHA:	
ELABORÓ		REVISÓ	
		LOGO DEL CONTRATISTA	NOMBRE DEL CONTRATISTA

Fuente:
elaboración
propia

de procesamiento automático de imágenes están dando nueva importancia a las técnicas fotográficas.

Al utilizarse medidores de radar, éstos suelen montarse en un trípode, en un vehículo o sostenerse con la mano para determinar las velocidades de los vehículos. Su uso es muy sencillo, pues basta con apuntar hacia el vehículo escogido, leer la velocidad directamente en una pantalla y anotarla. La velocidad aparece redondeada a kilómetros por hora (o millas por hora).

Como la velocidad que miden esos instrumentos es la del vehículo con respecto al medidor, ésta resulta menor con respecto a la vía. Esto sucede porque la distancia recorrida por el vehículo a lo largo de la vía es mayor que el cambio correspondiente en la distancia de éste al medidor. Para corregir ese error habría que dividir la velocidad medida entre el coseno del ángulo de incidencia, o sea, el que forma la visual del medidor al vehículo con la trayectoria del vehículo. Véase la Figura 5.10. Esto no es fácil porque, para que este ángulo no cambie, hay que mantener fijo el instrumento. De cualquier modo, si el ángulo es menor de 15° , los errores presentados no son importantes.

De todos los instrumentos que usa el ingeniero de tránsito y que ven los conductores, al que más temen es al medidor de radar. A fin de que su presencia no afecte la velocidad natural de los vehículos, debe po-

nerse gran cuidado en ocultarlo y, si es posible, apuntar a los vehículos por detrás.

De no disponer de este tipo de instrumentos, el empleo del enoscopio proporciona los datos de tiempo necesarios para calcular las velocidades. Una variación de este método consiste en el empleo de dos observadores en lugar de uno, de manera tal que el primer observador que encuentra la corriente del tráfico indica al segundo observador, mediante una señal, el instante en que el eje delantero del vehículo a registrar pasa en su marca. El segundo observador tiene que percatarse de la señal y de cuál es el vehículo objetivo de la medición. En ese momento acciona el cronómetro, el cual detendrá en el instante en que el eje delantero pase por su marca, registrando el tiempo medido en segundos.

5.4.3 Presentación de datos de campo

Resulta práctico entregar la información en medio magnético y ordenado en hojas de cálculo en cuyas columnas se debe presentar la siguiente información de la Figura 5.11.

Adicionar a dicha información un esquema o plano adecuado para indicar el sitio en el cual se realizó el ejercicio, permitirá completar el registro del aforo.

Con los valores de velocidad y del porcentaje de las observaciones se puede cons-

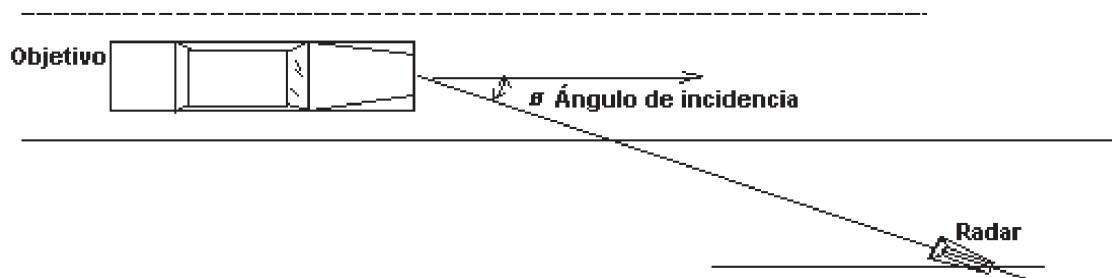


Figura 5.10
Ángulo de incidencia, ϕ , entre la trayectoria y la visual del radar del vehículo

Fuente:
elaboración propia

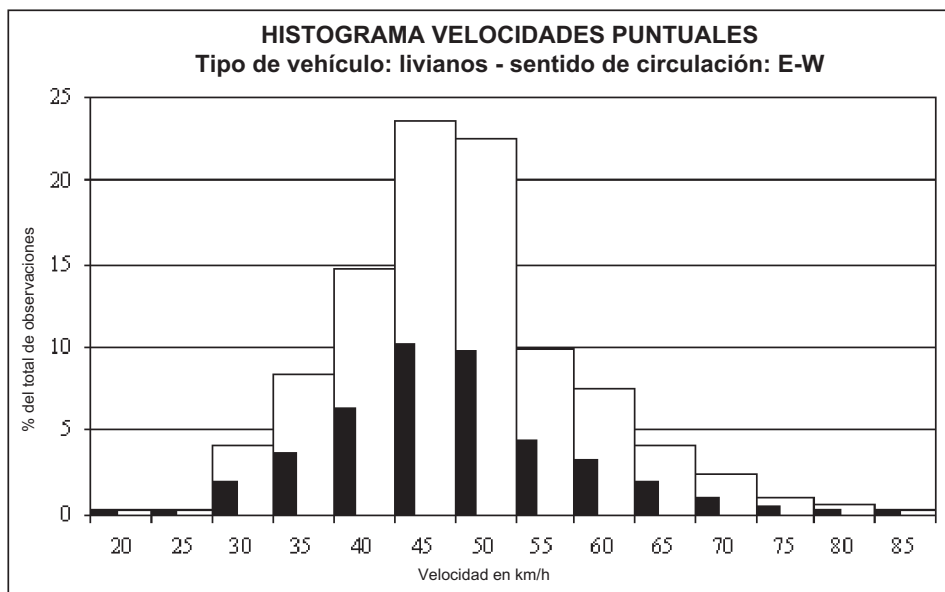


Figura 5.13
Histogramas de velocidades puntuales

Fuente:
elaboración propia

5.5 TIEMPO DE RECORRIDO POR EL MÉTODO DEL VEHÍCULO EN MOVIMIENTO

Este procedimiento puede proporcionar tiempos de recorrido, datos sobre demoras y también volúmenes y densidades de tránsito. El procedimiento se ejecuta principalmente en vías urbanas o suburbanas donde la densidad del tránsito y su regulación producen reducciones apreciables en la velocidad de los vehículos.

- Los vehículos empleados para mediciones de variables deben estar en óptimas condiciones mecánicas y cada conductor debe realizar los recorridos en forma natural, pero procurando “flotar” en la corriente del tránsito.

- Si los objetivos del estudio no solicitan análisis específicos, los recorridos se realizarán en días típicos de una semana cualquiera, generalmente de martes a jueves, con el propósito de abarcar condiciones de comportamiento normal en la corriente del tránsito.
- Dependiendo de la duración del recorrido establecido, se sugiere programar descansos de quince minutos por cada

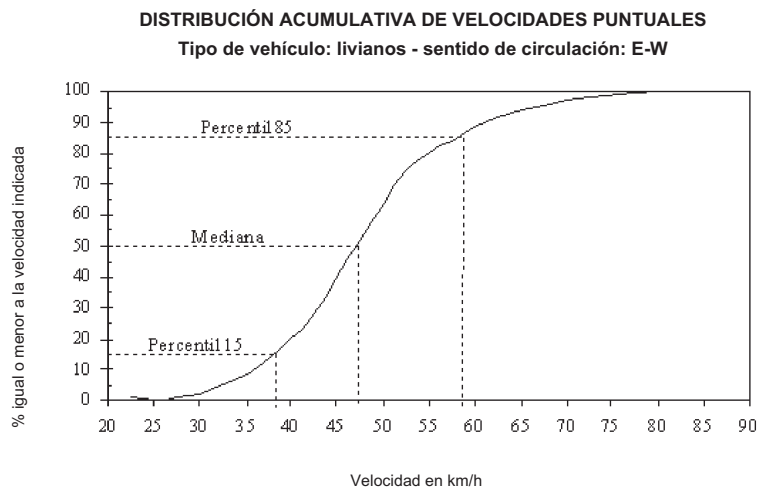


Figura 5.14
Curva de distribución acumulativa de las velocidades puntuales

Fuente:
elaboración propia

dos horas de trabajo continuo, con el propósito de que tanto los observadores como el conductor puedan bajar del vehículo y relajarse un poco.

- ♦ Los puntos de control para el ejercicio deben ser establecidos con anterioridad por el ingeniero encargado de la planeación del estudio, para lo cual debe realizar un recorrido en el que identifique claramente los sitios precisos a utilizar como referencia y determinar, como primera aproximación, el número de demoras que puede esperar que ocurran en cada uno de los tramos definidos, con el propósito de dejar en blanco las filas suficientes en el formato de campo.
- ♦ Las lecturas de tiempo para registrar el paso del vehículo por los puntos de control y la definición de las demoras, se realizan de manera acumulada de acuerdo con lo registrado en el cronómetro. De acuerdo con esto, el observador debe estar familiarizado con el manejo del cronómetro para que lo pueda consultar correctamente sin que éste se detenga o se reinicie desde ceros.
- ♦ Se sugiere emplear dos cronómetros, los cuales se accionan al mismo tiempo en el momento del paso del vehículo por el punto inicial del corredor, con la idea de tener uno de respaldo en el caso de que alguno de los dos falle en el desarrollo del ejercicio.

En los lugares donde las demoras, por dos o más causas, se acumulen, es conveniente que el observador realice la anotación de cada una por separado; si las demoras se traslapan, el observador debe estar en capacidad de asignar el tiempo total de la demora a la causa más relevante o representativa dentro de las que se presentan.

5.5.1 Planeación

En este procedimiento, un vehículo flotante recorre varias veces el tramo de vía en estudio a una marcha que puede determinarse, de dos maneras. En la primera, el conductor del vehículo trata de “flotar” en la corriente vehicular, procurando que el número de vehículos que adelante sea igual al que rebase el vehículo flotante. En la segunda, se dan instrucciones al conductor del vehículo flotante para que conserve una velocidad que, a su juicio, sea el promedio de la de todos los vehículos en ese momento. Algunos consideran que el primer procedimiento puede resultar peligroso si el conductor se afana demasiado por mantener el equilibrio entre los sobrepasos. La tendencia actual es utilizar el segundo procedimiento pues se considera que, a la luz de la experiencia, sus resultados han sido satisfactorios. Otros procedimientos menos empleados consisten en seguir un vehículo elegido al azar o indicar al conductor que maneje en forma natural, después de calibrar su velocidad libre con respecto a la de otros conductores. También se ha usado un procedimiento en que el conductor del vehículo trata de ir a la velocidad máxima permitida, a menos que no pueda alcanzarla; sin embargo, donde la velocidad máxima no se respeta, la velocidad del vehículo flotante será muy inferior a la media, e incluso el vehículo puede constituir un estorbo al tránsito.

Durante los recorridos del tramo en estudio, se mide el tiempo de recorrido total del tramo y los tiempos de detención en ciertos puntos a lo largo del mismo, si se desea conocer éstos. Antes de emprender los recorridos hay que determinar los puntos iniciales y finales del tramo, así como los puntos de control donde se considere importante registrar tiempos de recorrido parciales o medir de-

moras. En arterias urbanas, donde más se usa este método, los puntos de control naturales son las intersecciones controladas con semáforo; en autopistas se utilizan puntos específicos en los ramales de entrada y salida; mientras que en carreteras de dos carriles se han usado como puntos de control (sólo para tiempo de recorrido) los lugares donde cambian las características de la vía del tránsito o del terreno.

Aun cuando se usen instrumentos registradores es importante conocer por adelantado la longitud del tramo de estudio y la distancia entre puntos de control, tomándolos de planos o inventarios existentes o midiéndolos por los medios más expeditos de que se disponga. Naturalmente, hay que tener adiestrados al conductor del vehículo flotante y a los observadores.

Estos estudios se suelen hacer en vías principales donde la fluidez del tránsito sea motivo de preocupación de administradores, ingenieros y usuarios. Generalmente estos estudios se realizan en días entre semana y a horas pico, que son las situaciones más críticas, pero muchas veces hay que medir tiempos de recorrido también en horas valle para compararlos con los de las horas pico. Robertson (1994, p. 54) recomienda que la longitud mínima del tramo estudiado sea una milla, que es poco más de kilómetro y medio, aunque esto se define según lo requerido.

Las observaciones que se hacen para estimar el tiempo de recorrido constituyen una muestra con la que se calcula una media. El tamaño necesario de la muestra, es decir, el número mínimo de observaciones o recorridos que se deben hacer depende, como se ha visto, del error tolerable de la media de las velocidades de recorrido estimadas y de la variabilidad o dispersión de las observaciones. Box y Oppenlander (1985, p. 100) reco-

miendan los siguientes valores para este error, por exceso o por defecto:

- ♦ Para estudios de planeación: de 5.0 a 8.0 km/h.
- ♦ Para análisis de circulación y evaluaciones económicas: de 3.5 a 6.5 km/h.
- ♦ Para estudios anteriores y posteriores a un cambio: de 2.0 a 5.0 km/h.

La variabilidad de las observaciones en estos estudios en arterias urbanas puede ser muy grande, pues el tiempo de detención del vehículo flotante en el acceso de cada intersección controlada con semáforo influye poderosamente en su tiempo de recorrido, en especial cuando los semáforos están mal coordinados o el recorrido se hace en el sentido no favorecido por su coordinación.

Box y Oppenlander (1985, p. 101) recomiendan que se use como medida de la variabilidad lo que llaman amplitud media de las velocidades de recorrido, y que se puede estimar por:

$$\frac{\text{Suma de las diferencias entre velocidades consecutivas}}{\text{número de velocidades de recorrido observadas}} \quad 5.2$$

El numerador de la expresión anterior se halla calculando la suma de las diferencias absolutas entre las velocidades medias medidas en dos recorridos consecutivos [(del primero - del segundo) + (del segundo - del tercero), etc.]. Si se conoce el valor de esta amplitud media de estudios anteriores, se puede usar para determinar en principio el número de recorridos; luego, según se vayan haciendo recorridos y se disponga de velocidades medias de recorrido se puede ir refinando la estimación del número de recorridos. Si no se tiene idea sobre el valor de la amplitud media, habrá que hacer al menos dos recorridos de prueba para estimarla,

aunque Robertson (1994, p. 55) recomienda que el número mínimo sea cuatro.

Una vez estimada la amplitud media de las velocidades de recorrido y seleccionado el valor del error máximo tolerable de la media de velocidades, se va a la Tabla 5.4 y se determina el número mínimo estimado de recorridos en un sentido y para cierto tipo de condiciones.

Una vez calculada la media de las velocidades observadas en cada recorrido, se puede determinar su intervalo de confianza, como se muestra en lo relativo a velocidades puntuales. Si se estima que es demasiado amplio, puede ser aconsejable hacer recorridos adicionales.

En vías rurales, donde las paradas son ajenas a las restricciones que impone la vía y el tránsito, se puede utilizar la velocidad de marcha (si se miden los tiempos de detención) para calcular el número de recorridos. Como esta velocidad tiene generalmente menor variabilidad que la velocidad de recorrido, la muestra necesaria sería menor.

En medio urbano, y especialmente en arterias con gran densidad de semáforos, las paradas sí cuentan y suelen ser el factor preponderante que reduce el tiempo de recorrido. Ignorarlas en el cálculo del número de recorridos sería ignorar la parte más importante del problema, a no ser que las demoras por detención se midieran y analizaran inde-

pendientemente, lo que no parece una mala idea cuando estas demoras son largas y frecuentes.

Para la medición de estas demoras se utiliza un vehículo liviano con su conductor, cuyo odómetro y velocímetro funcionen en perfecto estado, y un observador provisto de cronómetro con el que se medirán de manera simultánea los tiempos de recorrido y los tiempos de detención, un anotador que se encargara de registrar los datos requeridos, una tabla de apoyo y hojas de campo como la mostrada en la Figura 5.15.

También se pueden realizar registros automáticos de los tiempos de recorrido y demoras con los instrumentos electrónicos instalados en el vehículo flotante, conectados a su transmisión para recibir pulsaciones consecutivas de ella cuando el vehículo está en marcha, las que están relacionadas directamente con la distancia recorrida. Este método funciona en forma parecida al odómetro, pero es mucho más preciso que éste cuando se calibra correctamente. Acoplado a un computador portátil puede medir tiempos de recorrido y de detención, así como velocidades, empleando solamente el conductor del vehículo. Basándose en mediciones precisas de tiempo y distancia calcula velocidades en intervalos hasta de medio segundo y construye automáticamente perfiles de velocidades contra el tiempo o la distancia.

Tabla 5.4
Muestras para estudios de tiempo de recorrido - nivel de confianza de 95%

Fuente:
Adaptado de Box y Oppenlander (1985, p. 101)

Amplitud media de la velocidad de recorrido (km/h)	Número mínimo de recorridos para un error tolerable específico (km/h)			
	2.0	4.0	6.0	8.0
5.0	4	3	2	2
10.0	8	4	3	2
15.0	14	6	4	3
20.0	21	8	5	4
25.0	28	11	6	5
30.0	38	13	8	5

También debido a la gran popularidad que han alcanzado los teléfonos celulares, su uso como medio de información sobre el tránsito se ha difundido mucho. Algunas alcaldías de Estados Unidos han establecido un número para teléfonos celulares a los que se puede llamar para avisar sobre accidentes, vehículos varados que estorben la circulación, semáforos descompuestos y otras anomalías. Un paso adicional ha sido la distribución gratuita de estos teléfonos a viajeros cotidianos para que éstos llamen a un centro de operaciones cuando pasan por ciertos puntos de control en vías principales. De este modo es posible calcular el tiempo de recorrido en “tiempo real” en distintas partes de la red vial y poder informar por radio a sus usuarios sobre las vías más expeditas. También se usa esta información para investigar dónde y cuándo ocurre habitualmente congestión del tránsito a fin de estudiar remedios para mitigarla.

En la ciudad de Washington se ha ensayado, con resultados alentadores, la determinación de la posición de los conductores que tienen teléfonos celulares por procedimientos de triangulación desde varias torres de teléfonos celulares. De este modo los conductores no tienen que llamar.

La identificación automática de vehículos es otro mecanismo que se está usando cada vez más para el cobro automático de peaje. Se coloca un dispositivo identificador en el vehículo (*transponder*) para que cuando pase cerca de una unidad lectora transmita a ésta la identidad del vehículo, la que se puede usar para actualizar el saldo de su cuenta de peaje o para otros fines, como recoger información sobre su viaje. Mediante un gran número de vehículos equipados en esta forma y unidades lectoras situadas en lu-

gares estratégicos, es posible conocer tiempos de recorridos entre esos lugares continuamente.

Mediante la localización automática se puede localizar la posición del vehículo a intervalos frecuentes o continuamente. Para ello el vehículo debe estar provisto de una unidad transmisora que informe sobre su posición con respecto a puntos de referencias, como lugares fijos en el terreno o satélites. Si se usa una base de datos cartográfica, es posible calcular tiempos de recorrido en tramos específicos de la red vial. Esta técnica se ha usado extensamente para localizar la posición de buses en su recorrido y vigilar el cumplimiento de su horario.

La hoja de campo que puede usarse para el procedimiento con vehículo liviano “flotante” se ilustra en la Figura 5.15. También en la Figura 5.16 se presenta un formato de campo para registrar los vehículos que encuentran el vehículo flotante con el fin de registrar el volumen y la densidad.

5.5.2 Ejecución

El método que se puede usar, basado principalmente en recomendaciones de Box y Oppenlander (1985 pp. 103-107), es:

- ♦ Antes de hacer los recorridos, se ponen en el formato de campo todos los datos que se conozcan o que haya que establecer de antemano, como la fecha, la identificación del tramo y la velocidad máxima a que se considere que un vehículo está detenido, que es generalmente entre 5 y 10 km/h. La determinación de esta velocidad es importante pues cuando los vehículos están en cola, suele haber ajustes en ésta que obliga a los vehículos a moverse lentamente y puede surgir la incertidumbre sobre si

TIEMPOS DE RECORRIDO Y DEMORAS (método del vehículo en movimiento)											
Fecha: (D.M.A.)		Hora inicio:		Localización:				Hoja:			
Día:		Hora final:						De:			
Condición climática:				Tramo:							
Sentido: _____						Sentido: _____					
Rec. No.	Hora	Veh. Liv.	Buses	Camiones	Total Vehículos	Rec. No.	Hora	Veh. Liv.	Buses	Camiones	Total Vehículos
1						1					
2						2					
3						3					
4						4					
5						5					
6						6					
7						7					
8						8					
9						9					
10						10					
11						11					
12						12					
13						13					
14						14					
15						15					
16						16					
17						17					
18						18					
19						19					
20						20					
21						21					
22						22					
23						23					
24						24					
25						25					
Observaciones:											
LOGO CONTRATANTE		NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE					NOMBRE DEL ESTUDIO				
NOMBRE:		NOMBRE:				LOGO DEL CONTRATISTA		NOMBRE DEL CONTRATISTA			
FIRMA:		FIRMA:									
CARGO:		CARGO:									
FECHA:		FECHA:									
ELABORÓ				REVISÓ							

Figura 5.16
Tiempos de recorrido y demoras. Vehículo flotante

Fuente:
Adaptado de Radelat, Raus y Wagner (1965, p. 28)

- ◆ Cuando se tiene todo listo para empezar, se detiene el vehículo poco antes de llegar al punto de inicio, y en el formato de campo mencionado se anotan los datos generales de última hora, relativos al recorrido que se va a hacer, como el estado del tiempo y la hora de inicio.
- ◆ Cuando el vehículo flotante pasa por el inicio del tramo, el anotador registra la

lectura del odómetro, o si se le facilita lo coloca en ceros, al tiempo que el observador pone en marcha el cronómetro y lo deja correr. Mientras se recorre la vía, se va leyendo y registrando la distancia acumulada en el odómetro según el vehículo va llegando a cada punto de control; estas anotaciones van en la tercera columna de la hoja de campo. En seguida se registra,

en la sexta columna, el tiempo acumulado del cronómetro. Las lecturas se realizarán cuando el vehículo pase sobre el eje de la vía transversal que constituye el punto de control a considerar.

- ♦ Para establecer los tiempos de detención, se registra en la cuarta columna el tiempo acumulado en el cronómetro cuando el vehículo se detiene o reduce su velocidad a un valor menor del que limita la detención; cuando el vehículo se pone en movimiento rebasando el límite de velocidad, se anota en la sexta columna el tiempo indicado por el cronómetro. La diferencia de estas dos lecturas es el tiempo de detención. En la séptima columna se indica la causa aparente de la demora escribiendo el símbolo correspondiente.
- ♦ Al llegar el vehículo flotante al final del tramo, se detiene el cronómetro, se lee el tiempo total de recorrido y se anota en la fila que contenga las vías que conforman el último punto de control.
- ♦ Si la vía es de circulación en ambos sentidos y se desea estudiar el sentido contrario, el vehículo da la media vuelta para empezar el siguiente recorrido en el otro sentido, de lo contrario deberá regresar al punto de partida antes de continuar las observaciones.
- ♦ Cada vez que se termina un recorrido y antes de olvidar los detalles del trabajo, se anota cualquier observación que estime pertinente.

Hay que tener en cuenta que los tiempos de recorrido y velocidades medidas por este método, solamente se aplican al modo de transporte en automóvil particular. Para el caso de buses urbanos habría que aplicar los procedimientos que se describen en el manual correspondiente.

Registro adicional de volumen y densidad

En vías con circulación en ambos sentidos, se pueden aprovechar los recorridos de medición de tiempo de recorrido y demoras para adquirir información general sobre el volumen y densidad del tránsito del tramo que se estudia. Para ello basta con registrar el número de vehículos circulando en sentido opuesto que encuentre el vehículo flotante mientras recorre el tramo. La toma de esos datos en forma manual generalmente requiere otro observador, pero un solo observador experimentado puede captarlo todo usando una grabadora de voz y la ayuda del conductor.

El volumen de vehículos en el sentido contrario, expresado en veh/h, se puede estimar aplicando la siguiente expresión:

$$V = \frac{50 \times N}{t_1 + t_2} \quad 5.3$$

donde,

V = volumen del tránsito en sentido contrario veh/h.

N = número de vehículos encontrados en el sentido contrario por el vehículo flotante

t_1 = tiempo de recorrido del vehículo flotante en la dirección 1, en minutos

t_2 = tiempo de recorrido del vehículo flotante en la dirección 2, en minutos

La densidad del tránsito en el sentido contrario al de recorrido del vehículo flotante está dada por el número de vehículos encontrados por éste en su trayecto dividido entre la longitud de vía que ocupaban esos vehículos.

Por tanto, expresando la densidad en veh/km y la longitud del tramo en metros, se

tiene que la densidad está dada por la ecuación

$$D = \frac{1.000 \times N}{L \times \left[1 + \frac{t_1}{t_2} \right]} \quad 5.4$$

donde,

D = densidad

L = longitud del tramo

El inconveniente de este método es que los datos sobre tiempo de recorrido y demora, por una parte, y de volumen y densidad por la otra, no corresponden al mismo período. Para establecer una relación más estrecha entre esos dos pares de variables, se han usado dos vehículos flotantes coordinados (Radelat, Raus y Wagner, pp. 6,7). Los vehículos del par arrancaban inicialmente a la misma hora y circulaban concurrentemente en sentidos opuestos. Su coordinación se logró comparando el punto de encuentro de los dos vehículos con el punto medio del tramo: si no se encontraban en el punto medio, el vehículo “adelantado” retrasaba algo el inicio del recorrido siguiente (no disminuía su marcha!). Con un poco de práctica, los conductores aprendían a encontrarse muy cerca de la mitad del tramo y al mismo tiempo comportarse como el conductor medio.

De este modo, cada vehículo registraba los tiempos de recorridos correspondientes a los volúmenes y densidades que el otro vehículo registraba y viceversa. Una vez terminados los recorridos, se integraban los datos de los recorridos opuestos realizados concurrentemente.

El registro de los vehículos que va encontrando el vehículo flotante se puede realizar usando computadoras portátiles. Si los tiempos de recorrido y detención se registran automáticamente con instrumentos electrónicos,

es posible computarizar todo el trabajo, incluidos la reducción y el análisis de los datos obtenidos.

En la Figura 5.16 se presenta una hoja de campo para el registro adicional de volumen y densidad.

5.5.3 Presentación de datos

Cuando se hace el registro manual del tiempo de recorrido y demoras, en primer lugar se procede a revisar estos tiempos. Con los datos del formato de campo se calcula el tiempo total de recorrido y demoras, tanto para cada tramo entre puntos de control como para toda el corredor estudiado. Si al tiempo total de recorrido se le resta el tiempo de las demoras, se obtiene el tiempo total de marcha.

Las velocidades de recorrido o de marcha se obtiene dividiendo la longitud del tramo o del corredor entre el tiempo de recorrido o de marcha respectivamente. Se recomienda diseñar hojas resumen, dependiendo del uso que se le vaya a dar al estudio. Las siguientes expresiones se utilizan para el cálculo de las velocidades:

$$V_d = \frac{60D}{T}; \bar{V}_d = \frac{60ND}{\Sigma T} \quad 5.5$$

donde,

V_d = velocidad de recorrido en km/h.

$\bar{V}_d$ = velocidad media de recorrido en km/h

D = longitud del tramo o del corredor en estudio en kilómetros

T = tiempo de recorrido en minutos

Es conveniente hacer hojas resumen que contengan la información de los principales indicadores de la operación, como valores medios de tiempos de recorrido, número y duración de las demoras en los diferentes perio-

dos del estudio, para visualizarlos en forma simultánea. Esto facilita la comparación e interpretación.

Para cada una de las velocidades, se pueden calcular otras medidas de tendencia central y de dispersión para una mejor descripción estadística de los resultados.

Cálculo de demoras

Para el análisis de posibles mejoras se recomienda clasificar los tipos de demoras de acuerdo con las descripciones dadas, calcular las duraciones totales, los valores promedio y los porcentajes del tipo de demora con respecto a las demoras totales de cada recorrido. Es conveniente aclarar que en un mismo sitio se pueden presentar demoras por diferentes causas, ante lo cual el anotador debe tener clara la priorización de las mismas.

Se pueden hacer diagramas de espacio-tiempo para visualizar en forma resumida los tiempos promedios de recorrido (parcial y acumulado). En las ordenadas se representa el tiempo acumulado y en las abscisas se representan el sistema de calles del corredor. Allí se puede representar las demoras promedio en cada sector o cruce de calles. La pendiente del diagrama espacio tiempo, en cualquier tramo representa la velocidad promedio para ese tramo.

Las demoras también se pueden representar mediante diagramas de barras horizontales o verticales, clasificando por dirección de recorrido y mostrando la duración y tipo de demora y la relación porcentual del total.

El procesamiento de la información de campo puede realizarse a partir de la Figura 5.17, el cual permite calcular y resumir las velocidades de recorrido y marcha, al igual que las demoras ocurridas durante la toma de información.

5.6 TIEMPO DE RECORRIDO POR EL MÉTODO DE LAS PLACAS DE MATRÍCULA

Este procedimiento consiste esencialmente en anotar el momento en que los vehículos que recorren un tramo de vía pasan por dos o más puntos del tramo, identificándolos por su placa de matrícula. Luego se calcula el tiempo de recorrido entre los puntos de la vía conociendo las distancias que los separa. Mide solamente tiempos de recorrido; no mide demoras. Su eficiencia depende en gran parte del número de vehículos que pasen por el tramo considerado, pues si el tránsito es intenso puede obtenerse una muestra aceptable en un tiempo relativamente corto y viceversa.

5.6.1 Planeación

Para que pueda medirse eficazmente el tiempo de recorrido entre dos puntos de una vía por este método, es preciso que gran parte de los vehículos que pasan por un punto pasen también por el otro. Si hay una intersección importante entre los puntos considerados que absorbe e inyecta un gran volumen de tránsito, es mejor hacer las mediciones antes o después de la intersección, o bien situar uno o más observadores adicionales junto a la intersección.

Lo que se dijo sobre la ubicación, día y hora del estudio por el método del vehículo en movimiento también se aplica aquí.

Se recomienda aplicar un método estadístico basado en lo descrito en la teoría estadística.

En la siguiente página se presenta una hoja de campo para realizar estudios de tiempo de recorrido por el método de las placas de matrícula, correspondiente a la Figura 5.18.

[illegible]

Figura 5.17
Resumen
datos y
resultados de
la información
de campo

Fuente:
elaboración propia

5.6.2 Ejecución

- ◆ Se selecciona el tramo o los tramos que se vayan a estudiar y se mide su longitud en la forma que se ha indicado para el método del vehículo en movimiento. Se calcula en forma preliminar el número de vehículos que se debe observar.

- ♦ Se sincronizan todos los cronómetros, y a partir de la hora convenida los observadores dictan a los anotadores, como información mínima, la última letra y los tres últimos números de las placas de matrícula de los vehículos que pasan, así como las lecturas de los cronómetros en esos momentos. Los números de las placas y las lecturas del cronómetro se escriben en la misma casilla de la hoja de campo, colocándolos, si es posible, en las columnas correspondientes a la primera cifra del número de la placa.
- ♦ Luego, en la oficina se halla la diferencia entre los momentos de observación correspondientes a cada placa, que será el tiempo de recorrido de cada vehículo.
- ♦ Si se usa una grabadora de voz, un solo observador puede registrar todos los datos necesarios, pero la transcripción en la oficina de lo grabado consume tiempo adicional. El trabajo de cotejar a mano las dos observaciones es largo y tedioso. Es mejor “digitalizar” las observaciones en la oficina y realizar todo el trabajo de reducción y análisis de la información en computador mediante programas informáticos.

También pueden usarse cámaras o filmadoras de video para observar los vehículos y “digitalizar” los datos en la oficina. Es importante que las cámaras puedan captar el número de la placa, de otra forma habría que identificar cada vehículo en cada imagen por su color y otros detalles, lo que es muy laborioso.

Una alternativa moderna es usar computadores portátiles para registrar los números de placa (el registro de la hora es automático) y dejar que la informática se encargue de cotejar los números de placa, calcular los tiempos de recorridos, indicar los que parezcan erróneos, y efectuar el análisis estadístico. Otra al-

ternativa más moderna es usar una filmadora que lea automáticamente los números de las placas usando técnicas de procesamiento de imágenes, lo que acelera notablemente el estudio.

5.6.3 Presentación de datos

Resulta práctico para el cálculo correspondiente de los tiempos de viaje, la digitalización de los datos. A continuación se presenta los campos que permiten organizar dicha información tanto en su presentación como para el manejo de los mismos. Es importante adicionar a dicha información un esquema o plano adecuado que indique el tramo sobre el cual se realizó la toma de la información.

5.7 TIEMPO DE DETENCIÓN EN INTERSECCIONES CONTROLADAS POR SEMÁFORO

Las demoras que se producen cuando los vehículos atraviesan intersecciones son generalmente las más importantes que tienen lugar en el medio urbano.

Existen tres tipos de demoras: (1) el tiempo en que están detenidos en el acceso a la intersección; (2) las demoras resultantes de las deceleraciones para detenerse y las aceleraciones para seguir su marcha normal y (3) la diferencia entre el tiempo que tarda el vehículo en atravesar la intersección y su acceso y el que resultaría de recorrer la misma distancia a la velocidad normal de marcha.

El objeto primordial del estudio de campo de detención en intersecciones controladas por semáforo es proporcionar un medio de fácil aplicación para evaluar globalmente la efectividad de todos los ele-

mentos de la intersección semaforizada que afectan la circulación del tránsito en uno o varios de sus accesos. Además, determina con mayor precisión, en una intersección semaforizada, el tiempo de detención estimado por un estudio de velocidad de recorrido.

Este tipo de estudios está indicado para intersecciones donde suelen ocurrir demoras considerables, identificadas por quejas de los usuarios o por estudios de tiempos de recorrido y demoras. Algunas de las recomendaciones para realizar este estudio de campo se presentan a continuación.

- ◆ Con el propósito de facilitar la parte operativa en campo, la toma de información se puede realizar por carriles, teniendo en cuenta que estos datos se deben agregar para realizar el cálculo y el análisis para cada uno de los accesos que conforman la intersección.
- ◆ Los intervalos de conteo deben ser adoptados de acuerdo con el ciclo del semáforo que controla las intersecciones.
- ◆ El conteo de los vehículos dentro de cada intervalo escogido considera los vehículos detenidos en el momento del registro, sin importar si se encontraban o no en un periodo anterior.
- ◆ La determinación del total de vehículos detenidos y los que no paran, por minuto de conteo, es una clasificación opcional. En todo caso, la toma de información en campo si debe incluir el total de los vehículos que llegan al acceso en cada uno de los minutos considerados dentro del periodo de conteo.
- ◆ Si se opta por determinar la clasificación anterior, se debe tener en cuenta que el total de vehículos detenidos por minuto se hace tomando en cuenta una sola vez a los vehículos detenidos.

- ◆ Independiente de sí se clasifica el total de los vehículos que se detuvieron y los que no se detuvieron en cada minuto, es de tener en cuenta que esta información debe ser recopilada por un aforador diferente de aquel que establece los vehículos detenidos en cada intervalo.
- ◆ Para complementar los resultados obtenidos en este estudio, es conveniente analizar el comportamiento de los conductores ante todos los elementos de la intersección que afectan la circulación.
- ◆ La toma de la información generalmente se realiza en los períodos pico de las intersecciones que conforman el corredor objeto del estudio.

La determinación de los intervalos de conteo se realiza por medio de cronómetros, los cuales se accionan al comenzar el período considerado para la toma de información. Es de resaltar que la iniciación de la actividad debe estar correctamente sincronizada por el coordinador en campo.

5.7.1 Planeación

Reilly, Gardner y Kell (1976, p. 87) consideran que el número mínimo de observaciones por acceso en la intersección debe ser 60. Box y Oppenlander (1985 p. 111, 112) presentan en su obra un procedimiento muy elaborado para determinar el número mínimo de observaciones, basado en la proporción de vehículos que paran, el nivel de confianza elegido y el error tolerable, utilizando la distribución de chi cuadrado.

El *Manual de capacidad vial* de Estados Unidos de 2000 (p. 16-90) establece que el intervalo entre observaciones debe estar entre 10 y 20 segundos; sin embargo, para efectos de la medición no es preponderante que el intervalo elegido corresponda a un valor

DETENCIÓN EN INTERSECCIONES CONTROLADAS POR SEMÁFORO						
Fecha: (D.M.A.)		Hora Inicio:		Intersección:		Hoja:
Día:		Hora Final:				De:
Condición climática:		Período del formato:		Acceso:		No. de carriles:
MINUTO INICIAL	NÚMERO DE VEHÍCULOS DETENIDOS, Vd				TOTAL DE VEHÍCULOS	
	+ 0 - 15 seg.	+ 15 - 30 seg.	+ 30 - 45 seg.	+ 45 - 60 seg.	PARAN	NO PARAN
Sub-Totales					Vd =	
Totales	Σ Vd =				Vt =	
Tiempo detención, $T_d = l \times \Sigma V_d =$ _____ veh-s.						
Tiempo detención, promedio por total vehículo que paran, $T_d / V_d =$ _____ seg.						
Tiempo detención promedio / vehículos en el acceso, $T_d / V_t =$ _____ seg.						
Porcentaje vehículos que paran $V_d / V_t =$ _____						
Observaciones: _____						
LOGO CONTRATANTE	NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE			NOMBRE DEL ESTUDIO		
NOMBRE:		NOMBRE:		LOGO DEL CONTRATISTA	NOMBRE DEL CONTRATISTA	
FIRMA:		FIRMA:				
CARGO:		CARGO:				
FECHA:		FECHA:				
ELABORÓ		REVISÓ				

Figura 5.20
Detención en intersecciones controladas por semáforo.
Formato de campo

Fuente:
elaboración propia

divisible por la longitud del ciclo. Valores de intervalos de 10, 15 o 20 segundos pueden ser apropiados. El manual estadounidense introduce un factor de ajuste, de naturaleza empírica, por el error que se puede cometer en el momento de determinar la demora, ya que este valor normalmente resulta sobreestimado.

Reilly, Gardener y Kell (1976, p. 9) recomiendan que se use una persona: (a) en accesos de un solo carril para cualquier volumen de tránsito, (b) en accesos de dos carriles si las colas no suelen pasar de 25 vehículos o 150 m en cada carril y (c) en accesos de tres o más carriles si las colas son menores de 10 vehículos o 60 m. En términos generales se recomienda que el personal sea asignado a cada uno de los diferentes carriles que conforman el acceso a estudiar, dada la dificultad de establecer, por parte de un solo aforador, el total de vehículos que paran y no paran. En este sentido, se recomienda un aforador por carril para identificar los vehículos que realizan desaceleraciones o aceleraciones y aquellos que transitan libremente (que no se detienen), y otro aforador más por cada carril para que registre los vehículos que se detienen totalmente.

El equipo fundamental que se utiliza consiste en relojes, tableros y formatos de campo como el mostrado en la Tabla 4.18. También pueden usarse cronómetros, grabadoras de voz y contadores de vehículos mecánicos o electrónicos, computadores portátiles de uso general o especial.

Se recomienda hacerlos en los días y horas donde se presuma que las demoras sean críticas.

La Figura 5.20 muestra una hoja de campo que será utilizada para los estudios de tiempos de detención en intersecciones controladas por semáforo.

El diligenciamiento de la hoja de campo es sencillo. En el cuadro superior derecho se dibuja un croquis de la intersección con su orientación y punto de observación. En el encabezado, donde dice carriles, se especifica el número de carriles a ser observados. Cuando se trate de un carril de uso exclusivo, se indica también el movimiento servido. En el renglón de observaciones se anota cualquier irregularidad adversa a las condiciones normales del tránsito que se presente durante el período del estudio.

En la primera columna del cuerpo del formato se anota el minuto inicial. En las columnas segunda a quinta, el total de los vehículos detenidos completamente en los momentos indicados por los encabezados de las columnas sin importar si algunos de ellos ya se contabilizaron en un período anterior. La clasificación de las columnas sexta y séptima corresponde, en el primer caso, a los vehículos que ingresan a la intersección y detienen la marcha (evidenciando una desaceleración); en la sexta se anotan los vehículos que paran durante el minuto correspondiente y en la séptima el número de ellos que no paran. Esta clasificación debe realizarla un aforador diferente de aquel que contabiliza los vehículos detenidos. En todo caso se debe realizar el aforo del total de vehículos, detenidos o no, en el acceso o carriles estudiados.

5.7.2 Ejecución

Al arribar al acceso de una intersección los vehículos pueden encontrar dos situaciones: que el acceso esté despejado, en cuyo caso el tránsito será continuo, o que se halle con vehículos que obligan a desacelerar la marcha y, eventualmente, a detenerse por efecto del control que realiza el semáforo sobre la intersección. Estas desaceleraciones o detenciones se deben medir a

efectos de determinar la demora en intersecciones controladas por semáforo.

Para ello se ha considerado diferenciar la medición de estas detenciones en dos componentes, los cuales establecen también el número de aforadores para la medición.

- ♦ El primero deberá contabilizar, de acuerdo con un intervalo previamente seleccionado, los vehículos que exclusivamente se encuentran detenidos totalmente; por ejemplo, si el intervalo es 15 segundos, el aforador deberá contar el número de vehículos que se encuentran detenidos durante ese intervalo sin importar que, durante dicho conteo, los primeros vehículos inicien la marcha. Se produce una situación difícil cuando la cola empieza a ponerse en marcha y los primeros vehículos ya no están detenidos. Hummer (1994, p. 72) recomienda que en este caso el observador identifique rápidamente el primero y el último vehículo de la fila que está detenida y a continuación cuente el número de vehículo entre ellos. Una vez que el intervalo termina, debe reiniciar el conteo para este nuevo intervalo, también sin importar que uno o más vehículos a contabilizar se encuentren nuevamente detenidos.
- ♦ El segundo aforador contabilizará los vehículos que se van sumando a la cola, es decir, aquellos que durante la marcha experimentan una desaceleración hasta detenerse y aquellos que no detienen la marcha o que logran cruzar por la intersección de manera prácticamente continua. Este segundo aforador no deberá estimar dichos vehículos que se detienen o que no lo hacen en función de un intervalo determinado. Aunque en el formato se aprecia que podría registrar dichos va-

lores en intervalos de 1 minuto, no significa que este valor obedezca a un intervalo dado, pues aquí lo importante es establecer el total de vehículos que se detuvieron y el total de los que no lo hicieron.

- ♦ Mientras tanto, cuando los volúmenes son altos, es preciso que un tercer aforador cuente el número de vehículos que llegan al acceso de la intersección o de la parte del mismo que se observa durante el periodo de estudio, cuyo total debe coincidir con el total suministrado por los aforadores que contabilizan los vehículos que se paran mas los que no paran. Para ello se pueden usar contadores manuales de volumen de tránsito, mecánicos o electrónicos.

Así mismo, se recomienda determinar antes de la medición hasta dónde llega la cola más larga que se espera, y se sitúa el observador u observadores en puntos adyacentes desde donde puedan ver la cola en toda su extensión. Cuando las colas son largas, puede ser conveniente determinar cuántos vehículos caben entre puntos fáciles de identificar, como postes o árboles, tratando de no incurrir en errores de paralaje.

Para saber cuando ha terminado un intervalo, se puede observar un reloj o cronómetro o utilizar una grabadora de voz con una cinta en la que se haya grabado una señal auditiva a intervalos iguales al seleccionado. La grabadora facilita el trabajo pues con ella el observador sólo tiene que fijarse en las colas.

5.7.3 Procesamiento y obtención de resultados

Al terminarse el período de estudio, se suman los vehículos registrados en cada columna y se añaden los totales de ellas para obtener el número de vehículos detenidos,

ΣV_d , que se ha observado. Al multiplicarse este número por el intervalo I , en segundos, se estima el tiempo total de detención T_d entre el número total de vehículos que llegaron V_t , y se calcula el tiempo de detención en segundos por vehículo.

El método supone que cada vehículo observado ha estado detenido durante un intervalo completo, lo que es sólo cierto cuando la longitud de las colas no cambia. Si ésta aumenta, el método sobreestima el tiempo de detención, y si disminuye lo subestima, pero se espera que esos errores se compensen. Es posible que los vehículos que estén en cola más de 15 segundos puedan ser observados más de una vez.

Se puede emplear una filmadora de video para realizar este estudio, lo que permite disminuir el número de observadores cuando los volúmenes son altos y comprobar datos dudosos. La dificultad principal para el empleo de la filmadora es que muchas veces no se puede encontrar un emplazamiento adecuado para ella.

Reilly, Gardner y Kell (1976, p. 87) establecieron la siguiente ecuación para determinar aproximadamente la relación entre el porcentaje de vehículos que se detienen (del volumen en el acceso), P_d , y el tiempo medio de detención, T_d .

$$T_d = 0,54P_d - 9,54 \quad 5.6$$

Aplicando esta ecuación, es posible tener una idea sobre cuál será el tiempo medio de detención si se conoce el número de vehículos que paran.

Los resultados del estudio de demoras en intersecciones controladas por semáforo, generalmente se resumen por acceso, calculando los siguientes datos:

- ♦ Tiempo de detención total, expresado en vehículos-segundo.

- ♦ Tiempo de detención promedio para el total de vehículos en el acceso, expresado en segundos.
- ♦ Tiempo de detención promedio para los vehículos detenidos, expresado en segundos.
- ♦ El porcentaje de los vehículos que pararon en el acceso.

El formato de campo de la Figura 5.20, presenta la formulación que permite establecer estos parámetros para periodos de 15 minutos (cada fila del formato corresponde a un minuto). Como se comentó, por facilidad operativa, la toma de información en campo se realiza de manera independiente en cada uno de los carriles que conforman el acceso seleccionado; para la determinación de los tiempos de detención en el acceso, la información de los carriles se agrega sumando directamente los datos recopilados en cada uno de los intervalos escogidos y para cada periodo específico.

Ahora bien, el Manual estadounidense (HCM-2000, p 16-90) establece una formulación en la que se introducen dos factores de reducción:

- ♦ El primero hace referencia a un factor de ajuste empírico, con un valor de 0,9 introducido por el error natural en el que incurre este tipo de técnicas de medición que normalmente sobre estima el valor de la demora.
- ♦ El segundo corresponde a un Factor de Corrección FC (Tabla 5.5), apropiado para el grupo de carriles en función de la velocidad a flujo libre. Dicho factor adiciona un ajuste por efecto de la demora ocasionada por la desaceleración o aceleración y el cual es aplicable únicamente en colas de hasta 30 vehículos.

Tiempo de detención en cola por vehículo;

Velocidad a flujo libre	≤ 7 Vehículos en cola	8 – 19 Vehículos en cola	20 – 30 Vehículos en cola
≤ 60 km / h	+5	+2	-1
> 60-71 km / h	+7	+4	+2
> 71 km / h	+9	+7	+5

Tabla 5.5 Factor de corrección para demoras por aceleración – desaceleración

Fuente:
Manual de Capacidad de Carreteras (HCM-2000)

$$d_{vq} = \left(I \frac{\sum V_d}{V_t} \right) 0.9; \quad 5.7$$

donde,

I = intervalo de detención de vehículos

V_d = total vehículos que se detienen

V_t = total vehículos en el acceso

Corrección de la demora por aceleración – desaceleración:

$$d_{ad} = \frac{V_p}{V_t} FC; \quad 5.8$$

donde,

FC = factor de corrección por aceleración – desaceleración

V_p = total vehículos que paran

5.8 OCUPACIÓN VEHICULAR

El objeto de la ocupación vehicular es determinar el número promedio de pasajeros que viajan en cada tipo de vehículo.

5.8.1 Planeación

De manera similar, las recomendaciones para el levantamiento de este tipo de información corresponden también a las expuestas para el registro de volúmenes de tránsito en intersecciones, descritas anteriormente. Durante el proceso de planeación deberá considerarse todos los aspectos técnicos, administrativos, logísticos y legales que permitan una adecuada toma de información.

Tal como se enunció en la toma de información de volúmenes para intersecciones, el personal preferiblemente debe ser de nivel universitario. Generalmente se emplea el método de conteo mecánico.

El formato de campo que se emplea para la toma de la información sobre la ocupación vehicular se presenta en la Figura 5.21. En la primera parte aparece el título del estudio a realizar; en la segunda parte del formato se solicita la siguiente información general:

- ◆ Fecha: día, mes y año, en el cual se está registrando la información de campo.
- ◆ Hora de inicio: hora inicial correspondiente al formato que en ese momento se está diligenciando. Es decir, cada formato tiene su propia hora inicial.
- ◆ Hora final: hora final correspondiente al formato que en ese momento se está diligenciando. Es decir, cada formato tiene su propia hora final.
- ◆ Localización: nombre o la dirección del sitio donde se está tomando la información.
- ◆ Condiciones climáticas: condiciones climáticas que existen en la intersección (soleado, nublado o lluvioso).
- ◆ Hoja No. ____ de ____: número de la hoja que se está empleando, y el número total de las hojas a emplear.
- ◆ Período: se define según el requerimiento del estudio.

En la tercera parte de formato aparecen los encabezados de las columnas donde se van registrando los datos obtenidos depen-

Figura 5.21
Estudio de
ocupación
vehicular.
Formato de
campo

[illegible]

diendo del tipo de vehículo y el número de pasajeros observado (0, 1, 2, 3, 4, 5, >5).

- ◆ Tipo de vehículo. Los vehículos se han clasificado de la siguiente manera:
 - Autos: corresponden a todos los vehículos livianos de uso particular (de cuatro ruedas).

- Taxis.
- Camiones: corresponden a todos los vehículos de carga de más de cuatro ruedas.
- Motos.

Finalmente se presenta información con respecto a:

- ♦ Sentido de circulación: sentido del tránsito que se está registrando.
- ♦ Observaciones posibles del desarrollo del estudio.
- ♦ Elaboró: nombre de la persona encargada de tomar la información.
- ♦ Revisó: nombre de la persona encargada de la supervisión del trabajo de campo.

Es importante resaltar que para llevar a cabo el estudio, los aforadores deben estar en el sitio de trabajo por lo menos 15 minutos antes de iniciar los estudios de campo.

5.8.2 Ejecución

Las actividades previas al trabajo de campo son similares a las anotadas en el numeral para los volúmenes vehiculares. Para la toma de la información, el trabajo de campo se realiza a través de la observación visual del aforador quien debe cuantificar para el caso de los vehículos particulares (autos, camiones y motos), el número de pasajeros, incluyendo al conductor, que viajan en cada vehículo, regis-

trando la información en períodos previamente definidos. Para el caso de los taxis, se registra el número específico de pasajeros (incluyendo al conductor), que viajan en cada vehículo.

Es de resaltar que la información que se registra corresponde solo a una muestra, ya que lograr registrar toda la población de vehículos que pasan por el sitio demanda mayor cantidad de observadores, y que desde el punto de vista práctico no es necesario. De todas maneras, se sugiere que de manera complementaria con este estudio se esté realizando el estudio de los volúmenes vehiculares, con el fin de realizar la extrapolación de los resultados obtenidos en la muestra. El tamaño mínimo práctico debe ser del 85% del total del volumen medido en el sitio observado.

5.8.3 Presentación de resultados

Resulta importante elaborar una hoja de cálculo con los siguientes campos que permitirán revisar y manejar su información.



Figura 5.22
Presentación de resultados de resultados para la ocupación visual

Fuente:
elaboración propia

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arboleda Vélez, Germán. *Intersecciones viales*, 1986.
- Arboleda Vélez, Germán. *Vías urbanas*, 1984.
- Arrimadas Saavedra, J. A. *Medida de Magnitudes Físicas en Ingeniería de Tránsito*. México, D.F.: División de Educación continua, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 1997.
- Asociación de Ingenieros del Valle. Actualización en vías.
- Association of Casualty and Surety Companies. *Manual of Traffic Engineering Studies*, Nueva York: ACSC, 1953.
- Cal y Mayor, Rafael y Cárdenas G., James. *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y aplicaciones*. 7ª edición, Alfaomega Grupo Editor, Cal y Mayor y Asociados, Universidad del Valle. México D.F., 2000. 517 p.
- Berry, D. S. y F. H. Green. "Techniques for measuring overall speeds in urban areas". Proceedings. Volumen 28, Highway Research Board, Washington, D.C.: Transportation Research Board, pp. 311-318.
- Box., Paul C. y Oppenlander, Joseph C. *Manual de estudios de Ingeniería de Tránsito*, Traducción del *Manual of Traffic Engineering Studies*. Cuarta edición, 1976. Institute of Transportation Engineers, Inc. Co-editores: Coordinación Nacional de Transporte, A.C., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México, 1985. 238 p.
- Institute of Transportation Engineers. ITE Journal. Enero a julio de 1998.
- ITE Technical Committee 5P-5 Capacities of Multiple Left Turn Lanes, Informe preliminar del Subcomité sobre Factores Geométricos, Washington, D.C.: Institute of Transportation Engineers, julio de 1991. Citado por Hummer (1994, p. 77)
- Hummer, J. E. *Manual of Transportation Engineering Studies*, Cap. 5: red. H. D. Robertson. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1994, 514 p.
- Hummer, J. E. Intersection and driveway studies, *Manual of Transportation Engineering Studies*, Cap. 5: red. H. D. Robertson. Englewood Cliffs, New Jersey: Prince Hall, 1994.
- Pignataro, L. J. *Traffic engineering: theory and practice*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1973.
- Radelat, G., J. Raus y F. A. Wagner. A method for evaluating the efficiency of traffic operations in a signalized system. Trabajo presentado al Comité de Calidad del Tránsito del entonces Highway Research Board, 1965, Washington, D.C.: Transportation Research Board. 42 p.
- Reilly W. R., C.C. Gardner y J.H. Kell. A technique for measuring delays at intersections. Informe FHWA-RD-76-135 de la Federal Highway Administration. Vol. 1 (Springfield, Virginia: National Technical Information Services, 1976).
- Roberston, H. D. Capítulos 3 y 4 del *Manual of Transportation Engineering Studies*, red. H. D. Robertson. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1994.
- Transportation Research Board. Highway capacity manual. National Research Council Washington, D.C., 2000.
- Turner, S. M. Advanced techniques for travel data collection. Trabajo presentado a la LXXV Reunión Anual de la Transportation Research Board, Washington, D.C.: TRB, 1996. 18 p. Este trabajo está basado en el informe de Lomax, T y otros, Quantifying congestion, Final Report del National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1995.

6

Estudios de Campo Usuarios

CONTENIDO

6.1	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES ANTE LOS DISPOSITIVOS DEL CONTROL DEL TRÁNSITO	6-5
6.1.1	Planeación	6-6
6.1.1.1	Ubicación, día y hora del estudio	6-6
6.1.1.2	Personal y equipo	6-6
6.1.2	Ejecución	6-7
6.1.2.1	Formatos de campo	6-8
6.1.3	Procesamiento y obtención de resultados	6-10
6.1.3.1	Recomendaciones	6-12
6.2.1	Planeación	6-14
6.2.1.1	Planeación del trabajo	6-14
6.2.1.2	Lista de verificación	6-14
6.2.1.3	Personal requerido	6-15
6.2.1.4	Recomendaciones de seguridad	6-15
6.2.1.5	Duración de los estudios	6-15
6.2.1.6	Posición del observador o aforador	6-15
6.2	ESTUDIOS DE PEATONES	13
6.2.1	Planeación	6-14
6.2.1.1	Planeación del trabajo	6-14
6.2.1.2	Lista de verificación	6-14
6.2.1.3	Personal requerido	6-15
6.2.1.4	Recomendaciones de seguridad	6-15
6.2.1.5	Duración de los estudios	6-15
6.2.1.6	Posición del observador o aforador	6-15
6.2.2	Ejecución	6-16
6.2.2.1	Estudio de volúmenes peatonales	6-16
6.2.2.2	Estudios de velocidad de marcha peatonal	6-20
6.2.2.3	Estudio de brechas para peatones	6-23
6.2.2.4	Medición de brechas disponibles en la corriente del tránsito	6-26
6.2.2.5	Estudio del comportamiento de peatones	6-28
6.2.3	Equipos modernos para observación y aforos peatonales	6-30
6.2.3.1	Equipos electrónicos de conteo	6-31
6.2.3.2	Equipos automáticos de conteo	6-32
6.2.3.3	Estudio del medio ambiente peatonal	6-32
6.3	Estudios para bicicletas	33
6.3.1	Volúmenes de bicicletas	6-33
6.3.1.1	Planeación	6-33
6.3.1.2	Ejecución	6-34
6.3.1.3	Procesamiento y obtención de resultados	6-35
6.3.2	Velocidades de bicicletas	6-37
6.3.2.1	Planeación	6-37

6.3.2.2	Ejecución	6-37
6.3.2.3	Procesamiento y obtención de resultados	6-39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		40

FIGURAS

Figura 6.1	Estudio del comportamiento de los conductores ante las señales de pare. Formato de campo	6-9
Figura 6.2	Estudio sobre comportamiento de los conductores ante los semáforos. Formato de campo	6-10
Figura 6.3	Estudio sobre el comportamiento de los conductores ante la señal de giro izquierdo prohibido. Formato de campo	6-11
Figura 6.4	Estudio sobre el comportamiento de los conductores ante la señal de giro derecho continuo con precaución en luz roja. Formato de campo	6-12
Figura 6.5	Codificación movimientos peatonales en intersecciones	6-16
Figura 6.6	Aforos de volúmenes peatonales. Formato de campo	6-20
Figura 6.7	Codificación movimientos peatonales en intersecciones constituidas por vías con separador central	6-21
Figura 6.8	Estudio de velocidad de caminata peatonal. Formato de campo	6-22
Figura 6.9	Estudio de brechas para peatones. Formato de campo	6-25
Figura 6.10	Estudio del comportamiento peatonal ante las indicaciones del semáforo. Formato de campo	6-30
Figura 6.11	Programación de personal y esquema de la intersección. formato de campo	6-36
Figura 6.12	Volúmenes de bicicletas. Formato de campo	6-37
Figura 6.13	Velocidad de bicicletas. Formato de campo	6-39

En este capítulo se describen los estudios que pueden realizarse para los diferentes usuarios de la vía, que pueden ser conductores, peatones y ciclistas. Así mismo, se describe la aplicación e integración de los diferentes aspectos a tener en cuenta en el análisis de los problemas típicos del tránsito y transporte en las zonas urbanas para cada tipo de usuario.

En lo referente a conductores, se tratarán los temas relacionados con su obediencia a los dispositivos de control del tránsito, específicamente a los semáforos. Para peatones, se recomiendan metodologías para la toma de velocidades de marcha, cálculo de brechas mínimas y volúmenes peatonales, entre otros. Finalmente, y como un tema nuevo, se incluyen las metodologías para toma de velocidades de marcha promedio y volúmenes de ciclistas.

6.1 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES ANTE LOS DISPOSITIVOS DEL CONTROL DEL TRÁNSITO

El estudio sobre el comportamiento de los conductores ante los dispositivos para el control del tránsito cobra gran importan-

cia hoy en día. Los profesionales que trabajan en el manejo del tránsito y la seguridad vial se preocupan por la actitud irrespetuosa de los conductores hacia dichos dispositivos.

Las razones pueden ser variadas: el desconocimiento de la señalización por parte de los conductores, la posición y ubicación inadecuada de las señales, la tendencia inherente a desobedecer, la falta de conciencia de lo que significa el acatamiento a una señal y la falta de control de la entidad de tránsito.

El presente estudio busca, mediante un registro simple del comportamiento de los conductores, medir el porcentaje de acatamiento u observancia que de alguna forma verifique la efectividad que tiene: la educación vial y la idoneidad de las campañas publicitarias sobre el respeto a los dispositivos del tránsito y a los reglamentos, su nivel de aplicación, su correcta ubicación y posición y la necesidad de implantar vigilancia adicional.

Este numeral básicamente considera los estudios que se realizan para observar el comportamiento de los conductores en las intersecciones de prioridad controladas con señales de pare, intersecciones con semáforos, restricciones de giros a la izquierda y giros derechos continuos con precaución en luz roja. Este último, aunque se presenta actual-

mente en la capital en un reducido número de intersecciones, es útil para hacer una evaluación del comportamiento y tener herramientas para definir acciones posteriores.

Estas técnicas también se pueden aplicar, de acuerdo con las necesidades, a otros estudios similares en las que se consideren restricciones y respeto a los dispositivos del control del tránsito, como límites de velocidad establecidos (principalmente en zonas escolares), pare en los cruces con el ferrocarril, carriles exclusivos de giros a la izquierda, giros en U prohibidos, prohibido dejar y recoger pasajeros y prohibido estacionar, entre otros.

El propósito para desarrollar este tipo de estudios es contar con una herramienta para:

- ♦ Evaluar el comportamiento del conductor ante los dispositivos para el control del tránsito.
- ♦ Evaluar la efectividad del dispositivo para el control del tránsito.
- ♦ Determinar puntos específicos donde la ineficiencia del control conlleve a accidentes, congestionamiento, etc.
- ♦ Desarrollar programas educativos para usuarios.
- ♦ Evaluar estudios comparativos de “antes y después”.

6.1.1 Planeación

La planeación de estos estudios debe contar como mínimo con los siguientes componentes.

6.1.1.1 Ubicación, día y hora del estudio

Este estudio se puede llevar a cabo en cualquier intersección o tramo vial donde exista un problema del comportamiento de los conductores ante los dispositivos para el

control del tránsito, en puntos específicos donde se haya detectado la ocurrencia de accidentes o donde se presente una alta incidencia de infracciones al reglamento de tránsito, por reporte de quejas de los usuarios, entre otros.

El estudio deberá realizarse en condiciones climáticas favorables y de tránsito normales, es decir, que no existan circunstancias que puedan afectar los resultados (preferiblemente en días hábiles y en períodos de actividad escolar).

Se recomienda hacer el estudio en las condiciones en las cuales se ha observado el problema o cuando parezca más evidente. Así, en las horas de máxima demanda aumenta la posibilidad de infringir el reglamento o la ocurrencia de accidentes. Normalmente, el conteo se lleva a cabo por períodos de 15 minutos, procurando cubrir un poco más del tamaño mínimo de la muestra. Si se desea hacer un estudio de comparación podrá hacerse en horas diferentes a los de máxima demanda. Cuando se realicen estudios de “antes y después”, se buscará que éstos se ejecuten en condiciones similares.

Se recomienda utilizar las metodologías descritas en el Tomo I, en el capítulo de Técnicas estadísticas para muestreos.

6.1.1.2 Personal y equipo

Se recomienda una persona por cada punto de observación, procurando que todas clasifiquen las observaciones de la misma manera, de acuerdo con las definiciones descritas anteriormente. El equipo fundamental a utilizar son relojes, tableros, lápices, borradores y hojas de campo, como las que se presentan posteriormente en este mismo capítulo.

Para registrar la descripción del sitio y el inventario del área de estudio en una in-

tersección típica, se puede utilizar el formato presentado en la Figura 6.11. Si es necesario, los formatos pueden modificarse para adaptarse a las necesidades que se presenten o para algún otro estudio similar.

Se puede emplear una filmadora de vídeo para realizar este estudio, lo que permite disminuir el número de observadores cuando los volúmenes son altos y comprobar datos dudosos. La dificultad principal para el empleo de la filmadora es que muchas veces no se puede encontrar un emplazamiento adecuado para ella.

6.1.2 Ejecución

La ejecución de este estudio consiste esencialmente en la observación y registro, en las hojas de campo correspondientes, del comportamiento de los conductores ante los dispositivos para el control del tránsito según sea el caso. Antes del inicio de las observaciones, se requiere hacer un inventario vial y de dispositivos para el control del tránsito que describa en detalle el sitio de estudio. Una buena descripción proporciona información importante en la interpretación del resultado. Básicamente se necesita:

- ◆ Datos específicos de la intersección o área de estudio: tipo de intersección, nombre oficial de las calles que la forman, clasificación de la vía, sentidos de circulación, usos del suelo, descripción general de la zona, etc.
- ◆ Geometría: número y ancho de carriles, ancho de los separadores central y laterales, ancho de andenes y bermas, movimientos por carril, canalizaciones e isletas, ubicación de paraderos de buses, obstáculos que restringen la visibilidad, vegetación, etc.
- ◆ Dispositivos para el control del tránsito y demarcación: ubicación de los semáforos en la intersección indicando las caras, su posición y las lámparas encendidas en el momento del estudio, señales de tránsito antes de la intersección, señales preventivas y demarcación 100 metros antes de la intersección, límite de velocidad en el acceso estudiado, ubicación de parqueo o su restricción, demarcación de separación y uso de carriles, línea de pare, cruce peatonal, etc., que describen el estado físico en que se encuentra cada uno de los dispositivos para el control del tránsito.
- ◆ En este tomo se describe detalladamente la forma de realizar la recopilación de la información para lograr un buen inventario vial y de dispositivos de control del tránsito vehicular.
- ◆ Los relojes utilizados para realizar los cortes de tiempo deben sincronizarse a la misma hora.
- ◆ Se busca que la posición del observador sea la más conveniente posible de manera que esté oculto al tránsito, y que estén visibles los dispositivos del control de tránsito del estudio, el acceso que se va a estudiar y el tránsito que circula en forma transversal a éste, evitando cualquier obstrucción.
- ◆ El comportamiento del conductor se registra según su actitud con una marca en la casilla correspondiente. La información se desglosa según su movimiento direccional en la intersección. Pueden diferenciarse los vehículos livianos, pesados y motocicletas asignando marcas distintas a cada uno. Las hojas de campo están diseñadas para hacer las observaciones en períodos de 15 minutos.

- ♦ Se continúa el registro hasta que se logra el tamaño de la muestra previsto. Al terminar el período de estudio, se suman los datos registrados en cada casilla sombreada y se añaden los totales de ellas para obtener el comportamiento de conductores.

6.1.2.1 Formatos de campo

Intersecciones de prioridad controladas con señales de pare

En la Figura 6.1 se muestra el formato para el estudio de comportamiento de los conductores ante las señales de pare. En éste deben llenarse los datos del encabezado e identificación, el nombre y sentido de circulación de las calles.

El observador se coloca en el lugar apropiado de manera que pueda ver la señal de pare y el tránsito que cruza transversalmente. Se indica el comportamiento del conductor cuando el vehículo sale del acceso de la intersección (esto es, cuando el vehículo cruza la línea de pare o la línea del sardinel del lado contiguo) mediante una marca en la casilla correspondiente, de acuerdo con el movimiento realizado, desglosado en cuatro grupos: detenido voluntariamente, detenido por el tránsito, prácticamente detenido y no se detuvo (explicados en detalle en la sección de definiciones). Si se desea clasificar el tipo de vehículo, una marca distinta para cada vehículo observado indicará que es pesado o motocicleta.

Intersecciones con semáforos

En la Figura 6.2 se muestra el formato para el estudio de comportamiento de los conductores ante los semáforos. Deben llenarse los datos del encabezado e identifica-

ción, el nombre y sentido de circulación de las calles.

El observador se ubica en el lugar apropiado de manera que pueda ver las luces del semáforo. Se indica el comportamiento del conductor, cuando el vehículo sale del acceso de la intersección (esto es, cuando el vehículo cruza la línea de pare o la línea del sardinel del lado contiguo), mediante una marca en la casilla correspondiente, de acuerdo con el movimiento realizado, desglosado en tres grupos: luz verde, luz amarilla o luz roja. Si se desea clasificar el tipo de vehículos, una marca distinta para cada vehículo observado indicará que es pesado o motocicleta.

Si se necesita desglosar el comportamiento de los conductores en luz roja-amarilla, puede considerarse aparte a los conductores que inician su marcha y cruzan la línea de pare o la línea del sardinel del lado contiguo, en la aparición de las luces roja-amarilla.

Intersecciones con restricción de giro a la izquierda

En la Figura 6.3 se muestra el formato para el estudio de comportamiento de los conductores ante la señal reglamentaria de giro izquierdo prohibido. Deben llenarse los datos del encabezado e identificación.

El observador se ubica en un lugar adecuado de manera que pueda observar los vehículos cuando se aproximan al lugar donde existe la prohibición. Se indica el comportamiento del conductor mediante una marca en la casilla correspondiente, desglosado en cuatro grupos: el conductor que gira a la izquierda y los conductores que siguen de frente o giran a la derecha, de acuerdo con el tipo de vehículo, si es liviano o pesado.

Figura 6.1
Estudio del
comportamiento
de los
conductores ante
las señales de
pare. Formato
de campo

Estudio de comportamiento de conductores ante la señal de pare					
Fecha: (D.M.A.)		Hora Inicio:		Localización:	
Día:		Hora Final:		Acceso:	
 Izquierda		 De Frente		 Derecha	
		Detenido voluntariamente			
		Detenido por el Tránsito			
		Prácticamente Detenido			
		No se Detuvo			
Observaciones:					
LOGO CONTRATANTE	NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE			Croquis:	
NOMBRE:		NOMBRE:		LOGO DEL CONTRATISTA	NOMBRE DEL CONTRATISTA
FIRMA:		FIRMA:			
CARGO:		CARGO:			
FECHA:		FECHA:			
ELABORÓ			REVISÓ		

Fuente:
elaboración propia

Intersecciones con giro derecho continuo con precaución en luz roja

En la Figura 6.4 se muestra el formato para el estudio de comportamiento de los conductores ante la señal de giro derecho continuo con precaución en luz roja. Deben

llenarse los datos del encabezado e identificación.

El observador se ubica en un lugar adecuado de manera que pueda observar las indicaciones del semáforo y el tránsito que cruza transversalmente. Se indica el comportamiento del conductor mediante una marca

Estudio de Comportamiento de Conductores ante Semáforos					
Fecha: (D.M.A.)		Hora Inicio:		Localización:	
Día:		Hora Final:		Acceso:	
Hoja:		De:			
Fase Sem.	← Izquierda	↑ De Frente	→ Derecha		
V E R D E					
	Livianos				
	Pesados				
A M A R I L L O					
	Livianos				
	Pesados				
R O J O					
	Livianos				
	Pesados				
Observaciones:					
LOGO CONTRATANTE	NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE			Croquis:	
NOMBRE:	NOMBRE:		LOGO DEL CONTRATISTA		NOMBRE DEL CONTRATISTA
FIRMA:	FIRMA:				
CARGO:	CARGO:				
FECHA:	FECHA:				
ELABORÓ			REVISÓ		

Figura 6.2
Estudio sobre comportamiento de los conductores ante los semáforos. Formato de campo

Fuente: elaboración propia

en la casilla correspondiente, desglosado en tres grupos principales: los conductores que hacen su giro en luz roja ya sea que el vehículo llegue solo o como parte de una fila que espera la luz del semáforo o en luz verde (explicados en detalle en la sección de definiciones).

6.1.3 Procesamiento y obtención de resultados

Una vez obtenida la información en las hojas de campo, se totaliza en las casillas correspondientes, el número de vehículos que realizó cada una de las acciones posibles. Al

Figura 6.3
Estudio sobre el comportamiento de los conductores ante la señal de giro izquierdo prohibido. Formato de campo

Estudio de comportamiento de conductores ante señal de giro izquierdo prohibido					
Fecha: (D.M.A.)		Hora Inicio:		Localización:	Hoja:
Día:		Hora Final:		Acceso:	De:
Tipo Veh.	← Izquierda	↑ De Frente y Giro Der.			
L I V I A N O S					
P E S A D O S					
Observaciones:					
LOGO CONTRATANTE	NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE			Croquis:	
NOMBRE:		NOMBRE:		LOGO DEL CONTRATISTA	NOMBRE DEL CONTRATISTA
FIRMA:		FIRMA:			
CARGO:		CARGO:			
FECHA:		FECHA:			
ELABORÓ			REVISÓ		

Fuente:
elaboración propia

final se resumen el número de conductores que cumplieron y los que no cumplieron.

El procesamiento es sencillo. Cada una de las acciones se cuantifica por medio de porcentajes; por esta razón se han cuantificado todos los vehículos que utilizan la intersección durante el período del estudio. Una vez obtenido el porcentaje, es necesario establecer si estos valores son altos, aceptables, normales o bajos, tomando en cuenta el entorno vial en el cual se encuentra el dispositi-

vo estudiado, así como el volumen vehicular total sobre el cual se establecen los indicadores porcentuales. Por ejemplo, un porcentaje de desobediencia de 5% ante la luz roja del semáforo puede indicar la necesidad de entrar a analizar los tiempos de verde de la intersección.

En el Manual anterior se indica como regla general que si se presenta un comportamiento de obediencia de sólo el 15% o menor, que existe un inconveniente con el propio dispo-

Estudio de comportamiento de conductores ante señal de giro derecho continuo en luz roja					
Fecha: (D.M.A.):		Hora Inicio:		Localización:	
Día:		Hora Final:		Acceso:	
Indicación del Semáforo	Comportamiento del Conductor	Vehículos Livianos	Total	Vehículos Pesados	Total
L U Z R O J A	Detenido por Completo				
	Detenido por el Tránsito				
	Detenido por Cruce de Peatones				
	(Sin ser parte de una fila) No se Detuvo				
L U Z R O J A	Detenido por Completo				
	Detenido por Cruce de Peatones				
	(Siendo parte de una fila) No se Detuvo				
L U Z V E R D E	Giró en Luz Verde o Amarilla				
	Detenido en Luz Roja en Espera de la Verde				
	En Espera Detrás de un Vehículo				
	Intentó Girar en Luz Roja (giró en "rojoamarillo" o en verde)				
Observaciones:					
LOGO CONTRATANTE	NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE			Croquis:	
NOMBRE:		NOMBRE:		LOGO DEL CONTRATISTA	NOMBRE DEL CONTRATISTA
FIRMA:		FIRMA:			
CARGO:		CARGO:			
FECHA:		FECHA:			
ELABORÓ		REVISÓ			

Figura 6.4
Estudio sobre el comportamiento de los conductores ante la señal de giro derecho continuo con precaución en luz roja. Formato de campo

Fuente:
elaboración propia

sitivo para el control del tránsito, ya sea por que no es claro, visible, lógico o adecuado.

Para tener una base de comparación o simplemente para establecer los rangos que permitan el análisis de un dispositivo de tránsito específico, es necesario llevar a cabo algunos estudios representativos en sitios aleatorios para cada uno de los dispositivos del tránsito que quieran ser analizados y con ellos comparar los resultados del estudio de comportamiento donde se piensa que existe un problema serio.

6.1.3.1 Recomendaciones

- ◆ Antes de iniciar las labores de campo, es necesario realizar un inventario vial y de dispositivos de control de tránsito para seleccionar la ubicación más propicia de los puntos de aforo.
- ◆ Para garantizar que el comportamiento de conductores estudiado es el habitual, los aforadores deben realizar su labor sin interferir con el tránsito normal ni ser percibidos por los usuarios del sector. Igualmente, deben permanecer alerta a

cualquier evento que pueda alterar las condiciones sobre las cuales se desea desarrollar el estudio.

- ◆ Por tratarse de un procedimiento de apreciación personal, es necesario dedicar un tiempo prudencial al entrenamiento del personal encargado de realizar la toma de información en campo para garantizar la unificación de los criterios a aplicar en el momento de la toma de la información.
- ◆ Los resultados se expresan en términos de porcentaje, resaltando la proporción de los conductores que no obedecen los señalamientos estudiados. La determinación de si los valores encontrados son altos o no, se realiza comparando con los resultados obtenidos en otras intersecciones donde se cuente con los mismos dispositivos evaluados.
- ◆ En términos generales, podríamos decir que un valor de desobediencia mayor de 5% indica la necesidad de ejercer controles severos en el comportamiento de los conductores. Si el porcentaje de obediencia es menor o igual al 15%, hay fallas en el dispositivo de control mismo y no en los conductores, razón por la cual se debe entrar a evaluar la disposición física de la señal dentro de la intersección, su condición de visibilidad o su grado de deterioro, entre otros factores.
- ◆ Los rangos porcentuales que se obtengan de este ejercicio deben ser analizados tomando en cuenta el valor total a partir del cual se han determinado y las condiciones del entorno geométrico de la vía o intersección que lo contiene.

6.2 ESTUDIOS DE PEATONES

Este estudio está orientado a conocer el comportamiento y desempeño de los peato-

nes cuando se encuentran compartiendo los derechos de vía con las corrientes vehiculares. Todas las personas son peatones en algún momento de su recorrido, y como tales están en desventaja frente a los vehículos cuando se presentan conflictos, especialmente en las intersecciones. Por esta razón, su seguridad debe ser la mayor prioridad para la autoridad de tránsito.

La caracterización del comportamiento peatonal generalmente se hace mediante la cuantificación de uno o varios de los siguientes parámetros:

- ◆ Volúmenes peatonales
- ◆ Velocidad de marcha peatonal
- ◆ Determinación de la brecha mínima segura
- ◆ Estudio de brechas en el tránsito
- ◆ Conflictos con los vehículos
- ◆ Comprensión y obediencia ante los semáforos y dispositivos de control de tránsito

En términos generales, los estudios peatonales se pueden aplicar para determinar la funcionalidad de los dispositivos existentes de control de tránsito, para calcular tasas de accidentes peatonales y para analizar los cruces de calles. Estos estudios permiten definir, planear y diseñar las mejoras y las operaciones de control apropiados para la seguridad peatonal, tales como las protecciones en cruces escolares o la definición de la fase peatonal en los semáforos.

Las mediciones o aforos se pueden hacer mediante observación manual o mediante equipos mecánicos o automáticos de propósito específico o computadores portátiles. Se pueden utilizar grabadoras, fotografías, dispositivos de detección y conteo y filmadoras o videograbadoras. La recolección de datos normalmente se hace bajo buenas condiciones climáticas, a menos que el estudio esté

orientado a determinar el efecto de las condiciones atmosféricas.

La mayoría de los estudios de volúmenes peatonales requieren datos de menos de diez horas, por lo que se hacen manualmente mediante la observación directa con aforadores debidamente entrenados. Por razones de tiempo y recursos, no se justifica el esfuerzo ni los costos de instalación de equipos automáticos, ni la posterior etapa de reducción de datos. Además, cuando se requiere la clasificación peatonal por grupos de edad, sexo, limitaciones físicas y tipo de comportamiento, resulta más funcional el aforo manual.

Los estudios para cuantificar los volúmenes y las características del tránsito peatonal deberían acompañarse idealmente con estudios para determinar el entorno peatonal y conocer el medio en el cual se desenvuelven. Normalmente se hace mediante encuestas para definir directamente el nivel de comodidad o conocer los inconvenientes que se presentan al peatón, de manera que se tomen las medidas adecuadas para solucionarlos.

En este manual se explica el procedimiento para la determinación de volúmenes peatonales, la velocidad de marcha peatonal, las brechas mínimas aceptables, brechas en el tránsito y se dan algunas pautas para el estudio del comportamiento del peatón ante situaciones de tránsito y para la aplicación de las fotografías aéreas en el estudio de peatones.

Con estos procedimientos se pretende analizar el comportamiento y el desempeño de los peatones cuando circulan por las instalaciones y los pasos destinados para su uso. Determinar los parámetros requeridos por la ingeniería de tránsito para el planeamiento, diseño y evaluación de las obras y controles destinado a la seguridad peatonal, como volúmenes, velocidad de marcha

peatonal y brechas disponibles en el tránsito y aplicar los resultados obtenidos para la justificación de acciones para el mejoramiento del cruce.

6.2.1 Planeación

6.2.1.1 Planeación del trabajo

Un estudio confiable y preciso comienza por las labores previas en la oficina. Los preparativos deben comenzar con la revisión del propósito, los procedimientos del estudio, el tipo de conteo u observación, el período e intervalo de conteo y cualquier información del sitio (esquema geométrico, orden de magnitud de los volúmenes de peatones y de vehículos por hora del día, magnitud del ciclo y fases de los semáforos, etc.). Esto permitirá definir el tipo de equipo, el procedimiento de campo y el número de aforadores. Si el propósito del estudio requiere buenas condiciones de tiempo, el analista debe definir los criterios para cancelar el conteo o suspender el procedimiento, si se presentan condiciones atmosféricas adversas.

La selección del equipo y los elementos, definen el tipo de formato de campo para la recolección de datos. Se deben ordenar los formatos de campo en la secuencia que se usarán en el campo y llenar previamente en la oficina la información de la sección de identificación correspondiente.

6.2.1.2 Lista de verificación

Se recomienda hacer una lista de verificación con el aporte de todo el equipo de trabajo para asegurar que se han hecho los preparativos para el estudio de campo antes de llegar al sitio de trabajo. Regresar a la oficina a recoger un equipo o un elemento olvi-

dado puede retrasar la iniciación del estudio e incluso posponerlo, lo que trae como consecuencia una importante pérdida de recursos.

La lista de verificación debe incluir, además de los aspectos tratados en la planeación del trabajo, los elementos y accesorios necesarios para el equipo de trabajo, como lápices, baterías, cronómetros, cintas de vídeo, candados, cadenas, cintas, impermeables, chalecos, un número adecuado de formatos de campo y las herramientas necesarias. Igualmente se debe verificar que los equipos funcionen correctamente.

6.2.1.3 Personal requerido

El tamaño del equipo de aforadores depende de la longitud del período de conteo, del tipo de conteo u observación, del número de pasos peatonales y de la intensidad del volumen. El número exacto de observadores se determina realizando un estudio piloto en el sitio de interés.

Los sitios más complicados para hacer los aforos y observaciones son las intersecciones, ya que en cada esquina de intersección se presentan hasta 12 movimientos peatonales y, en promedio, hay cuatro esquinas en cada intersección. Allí se requieren mínimo dos personas, que deben estar ubicadas en las esquinas diagonalmente opuestas, observando los peatones que se mueven tanto a su izquierda como a su derecha.

6.2.1.4 Recomendaciones de seguridad

Se deben prever medidas de seguridad y protección personal para la brigada de campo y para los equipos y elementos que se van a utilizar. El personal debe usar ropa adecuada para las condiciones prevalecientes del clima; cuando el aforador va a trabajar cerca

al flujo de tránsito, debe utilizar chalecos reflectivos de seguridad. Los observadores que trabajan a la intemperie pueden utilizar sillas para prevenir la fatiga y utilizar sombrillas para protegerse del sol, siempre y cuando estos elementos no distraigan a los conductores ni a los peatones. No es conveniente instalar señales informativas anunciando la realización del estudio, porque despierta la curiosidad de los conductores y peatones, lo que puede alterar las condiciones normales.

6.2.1.5 Duración de los estudios

El período de estudio puede ir desde unos pocos minutos hasta varias horas, incluso se pueden hacer aforos continuos, dependiendo del uso planeado de los datos y los métodos disponibles para la recolección. Los períodos de conteo manual y por video usualmente son inferiores a un día. El período de conteo debe evitar la ocurrencia de eventos especiales, a menos que el propósito del estudio sea analizar ese evento.

Mientras que para los estudios de conteo se define la duración del período de estudio, para estudios como los de observación se requiere recolectar un número mínimo de datos, correspondiente al tamaño requerido de la muestra para que sea representativa de las condiciones en análisis.

6.2.1.6 Posición del observador o aforador

Los aforadores y observadores se deben ubicar en un sitio donde vean claramente todos los peatones, bastante alejado del borde de la calzada por precauciones de seguridad personal y para no distraer a los conductores ni interferir en el flujo peatonal. El mejor sitio se obtiene buscando una ubicación por encima del nivel de la calle y libre de obstruc-

ciones. Cuando hay varios observadores aforando en un mismo sitio, deben estar visibles, manteniendo contacto visual entre ellos. Es necesario que puedan comunicarse fácilmente para lograr una mejor coordinación de las actividades y de los intervalos de tiempo.

Para la toma de la información, es importante que cada observador identifique la intersección que se va a aforar. Se recomienda que el aforador se ubique en una de las esquinas mirando hacia el centro de la intersección y localizando el ramal a su derecha.

Una vez identificado el ramal que se aforará, se deben distinguir los diferentes movimientos realizados por los peatones que cruzan dicho ramal. Con el propósito de uniformar la identificación de tales movimientos, se adopta un sistema de numeración que asigna el 1 a aquellos peatones que se acercan hacia el observador, el 2 a aquellos peatones que se alejan del observador; y el 3 a aquellos que eventualmente transiten por la diagonal de la intersección, acercándose al observador. La Figura 6.5 muestra la numeración de los movimientos de peatones en una intersección.

Cuando un solo observador registra los datos de dos ramales consecutivos, si las fases del semáforo se lo permiten, al situarse en cualquier esquina mirando a la intersección y observar el ramal derecho, al movimiento “viene” le corresponde el 1 y al movimiento “va” el 2, pero

cuando se observa el ramal a la izquierda, el que “viene” es 2 y el que “va” es 1. Esta circunstancia demanda que el observador se familiarice previamente con tal “cambio”.

Para evitar posibles confusiones con la codificación de los movimientos peatonales, se recomienda que el aforador maneje los movimientos basado en la concepción de “viene” y “va”, según el peatón se acerque o se aleje del aforador.

6.2.2 Ejecución

Existen varios tipos de estudios según el parámetro que se desea medir en campo. A continuación se describirán los diferentes estudios sobre peatones.

6.2.2.1 Estudio de volúmenes peatonales

Los volúmenes peatonales son significativos en los centros urbanos y deben ser tenidos en cuenta en el planeamiento y diseño de las instalaciones peatonales. El volumen re-

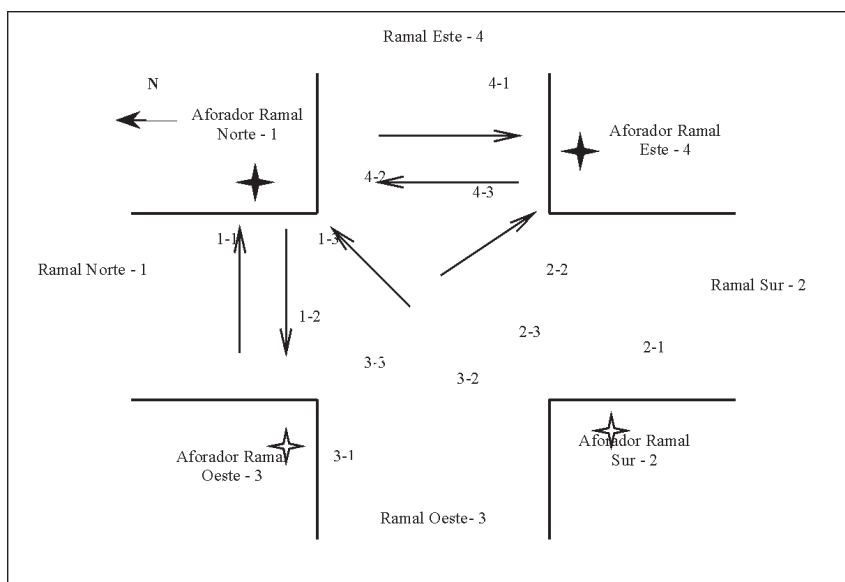


Figura 6.5
Codificación
movimientos
peatonales en
intersecciones

Fuente:
elaboración propia

gistrado en un aforo o conteo se denomina volumen actual y se expresa en unidades de peatones/hora.

La manera más sencilla para el registro de volúmenes de peatones es mediante aforos manuales con ayuda de contadores mecánicos y el uso de formatos de campo, previamente diseñados, en los cuales se puede contemplar cualquier clasificación peatonal deseada.

Los aforadores pueden hacer los conteos desde el interior de un vehículo siempre y cuando su visual no esté obstruida y no interfiera con la circulación normal de vehículos y peatones. Este tipo de estudio se realiza con el fin de medir los volúmenes de personas que circulan en una instalación peatonal e identificar los sitios críticos de flujos peatonales que ameriten un estudio más detallado para la planeación y diseño de mejoras.

Planeación

Los volúmenes se deben aforar en los accesos de una intersección, en los pasos peatonales o en una acera o un punto a mitad de cuadra. Los períodos de aforo normalmente corresponden a los días y horas críticas o de máxima demanda, que es cuando normalmente se presentan la mayoría de los problemas.

Un observador puede aforar con facilidad una intersección semaforizada de cuatro accesos con un solo carril y bajos volúmenes de peatones, si no se requieren clasificaciones ni conteos direccionales. Al incrementar los parámetros que se deben observar, se incrementa la complejidad y la necesidad de aforadores adicionales. Normalmente se requieren dos aforadores por intersección. Un observador puede aforar el paso peatonal norte y el oeste, mientras que otro afora el sur y el oriente, siempre y cuando en cualquier momento solo esté activo un cruce peatonal

para cada observador. Si el volumen peatonal es muy alto, cada aforador se encargará de un solo acceso o ramal.

La responsabilidad se puede dividir entre los observadores de diferentes maneras. Un aforador se puede encargar del registro de cierta clase de peatones, mientras que el otro registra el volumen total; o cada uno se encarga de determinado acceso. En sitios complejos se puede asignar un observador individual para los peatones o para una clasificación particular. También se puede programar una persona que tiene la función de relevar a los otros observadores sobre la base de un esquema de rotación.

En sitios con altos flujos peatonales y vehiculares se recomienda que los aforadores y observadores sean relevados periódicamente para evitar la fatiga y la reducción de su desempeño. Se debe procurar darles descansos de 5 a 10 minutos cada hora. Si los períodos de conteo son mayores de ocho horas, se deben dar descansos de 30 a 45 minutos cada cuatro horas.

Los conteos manuales sólo requieren cronómetro, tabla de apoyo, lápiz y formatos, y si hay disponibilidad, contadores mecánicos. Siempre se requiere un período de capacitación y entrenamiento de los aforadores u observadores para que se familiaricen con el procedimiento y el uso de los equipos.

Tamaño de la muestra

En los estudios de volúmenes peatonales, las observaciones se hacen durante cierto período representativo de las condiciones del sitio o instalación. Para garantizar una muestra con validez estadística y un análisis adecuado de los volúmenes peatonales, el manual anterior recomienda que la duración de los períodos de conteo típicos sean las siguientes:

- ◆ Dos horas para un período pico
- ◆ Cuatro horas para los períodos picos mañana y tarde
- ◆ Seis horas para períodos en la mañana, medio día y tarde
- ◆ Doce horas para el tiempo diurno (7:00 a.m. a 7:00 p.m.)

El intervalo de conteo de corta duración puede ser de 1, 5, 10, 15, 30 o 60 minutos. Los intervalos típicos para conteos peatonales son de 15 y 60 minutos de duración. Los conteos de peatones en intersecciones semaforizadas pueden resumirse por ciclos de semáforo. Los conteos obtenidos durante intervalos de corta duración se pueden expandir mediante varias técnicas con el fin de estimar los valores durante todo el período de estudio.

Ejecución

El procesamiento de la información consta de las etapas de reducción de datos y la totalización de los conteos por sentido y por acceso.

Después de la recolección de datos en bruto, éstos pueden disponerse de manera conveniente para el análisis. Esta reducción de datos consiste usualmente en convertir las marcas de conteo (rayas), en números, reducir los datos por cálculos de totales y subtotales y ordenar los datos en un formato para hacer los análisis. Una vez recibidos los formatos de campo debidamente diligenciados, se deben contar las rayas y colocar el número correspondiente en la columna “Total” para cada minuto y cada movimiento aforado. También se pueden hacer totalizaciones por intervalos de 15 minutos

Los datos de los conteos peatonales se totalizan por dirección o sentido, por acceso y por intersección. Posteriormente, se elaboran

tablas y esquemas resumen, tal como se hacen en los estudios de volúmenes vehiculares.

Se sabe que las restricciones de tiempo y recursos no permiten hacer un conteo continuo para cada ruta peatonal o para las intersecciones de todas las calles y avenidas existentes; por esto, los conteos se llevan a cabo en sitios específicos y en los períodos más críticos. Todos los resultados de los conteos de volúmenes en los períodos de aforo son muestras tomadas del universo o población. Los valores obtenidos de los conteos se ajustan o se expanden para obtener una estimación de los flujos esperados de peatones durante el período de análisis en los sitios de conteo o en sitios similares. La metodología a seguir se resume a continuación.

- ◆ Inicialmente se debe realizar la labor de planeación del trabajo de campo que permita: a) tener una estimación de los flujos peatonales en los sitios de estudio para definir el número necesario de aforadores para la toma de información; b) definir directamente en el sitio, la ubicación más favorable para los aforadores; c) capacitar al personal de aforadores sobre el diligenciamiento del formato y utilización de los equipos disponibles para garantizar la confiabilidad en la recolección de los datos, asignarles las tareas, e indicarles las responsabilidades y compromisos; d) distribuir el material y equipo necesario para el estudio entre los aforadores y sus credenciales o carnés de identificación.
- ◆ Los aforadores deben llegar al sitio de campo antes de la hora programada con cronómetro, formatos, lápices y contadores mecánicos, si se dispone de ellos, y ubicarse en la posición más favorable por visibilidad y comodidad de acuerdo con

el acceso o paso peatonal que se le haya asignado.

- ◆ Cada aforador debe concentrar su atención en el registro preciso de cada conteo, en el sitio apropiado, en el formato apropiado, contabilizando los peatones que pasan el cruce y totalizando cada minuto o por períodos de 15 minutos, según el tipo de intersección.
- ◆ Los flujos peatonales pueden variar en pequeños incrementos de tiempo. En intersecciones no semaforizadas, los peatones que esperan para el cruce, deben contarse cada minuto o menos según convenga. En las intersecciones semaforizadas, los conteos se deben hacer al inicio de cada intervalo de la fase peatonal. Normalmente se observa el grupo de peatones que espera cruzar la calle en intervalos periódicos, y se totalizan por ciclo del semáforo.
- ◆ En cualquiera de los formatos de campo que se utilicen, se debe registrar el paso de un peatón mediante una raya o marca en la respectiva columna de conteo correspondiente a la dirección y tiempo de aforo. El aforador se ubica en la esquina asignada de acuerdo con la programación del trabajo y debe contabilizar los peatones que van y vienen por su lado derecho, así como los que cruzan la intersección en diagonal.
- ◆ Se debe registrar cualquier evento atípico o anormal de tránsito, como accidentes, actividades de mantenimiento u otros eventos que puedan conducir a conteos anormales de tránsito y afectar los resultados del estudio.
- ◆ Se debe anexar el croquis de la intersección que la identifique plenamente mediante la dirección y orientación, la posición del observador, los sentidos de

circulación y la información que considere relevante relacionada con el estudio.

- ◆ Una vez finalizado el período de conteo, el aforador debe verificar que el diligenciamiento del formato de campo esté completo, lo firma y lo entrega al coordinador o supervisor del estudio para el archivo clasificado y posterior procesamiento.

Formatos de campo

En la Figura 6.6 se presenta el modelo recomendado de formato de campo para el registro de volúmenes peatonales durante una hora.

En la sección de identificación se registra la fecha y día del estudio en formato día, mes y año; el nombre o identificación de la intersección dada por la dirección o ubicación exacta; las horas del período o intervalo de aforo dadas por las horas de inicio y hora final en formato militar (0–24 horas); el ramal observado, encerrando la convención correspondiente (N-(1), S-(2), W-(3) o E-(4)) en un círculo, teniendo en cuenta la dirección, sentido y orientación del ramal; el estado del tiempo prevaleciente durante el aforo (bueno, regular malo, o soleado, nublado o lluvioso); la numeración secuencial de las hojas y el total de formatos utilizados en el período de aforo (se requiere un formato por cada hora de aforo). Finalmente se registran los nombres del aforador y del supervisor del estudio.

En el cuerpo del formato se encuentran las columnas del “Tiempo” acumulado en minutos (de 1 a 60), ya que el formato está diseñado para un período de una hora dividido en intervalos de un minuto.

En las columnas de “Movimiento aforado” se registra el paso de cada peatón mediante una raya, o formando cuadrado con

una diagonal para el registro del paso de cinco peatones. Estos registros se discriminan por tipo de movimiento (vienen, van y diagonal) de acuerdo con la convención adoptada.

En el pie del formato, aparecen unas líneas para registrar las observaciones o aclaraciones que se consideren relevantes y que puedan servir de explicación a situaciones anormales o de justificación de los datos recolectados. Los formatos deben llevar la firma del supervisor y del aforador.

Procesamiento y obtención de resultados

El análisis puede variar desde una simple extracción descriptiva de la información hasta el tratamiento estadístico más sofisticado de los datos dependiendo del tipo de estudio que se esté desarrollando.

Los resultados de los volúmenes peatonales permiten conocer la intensidad o los niveles del flujo que se utiliza para comparar con los criterios y justificaciones para el planeamiento, diseño o evaluación de semáforos o de obras de mejoras de seguridad

Estudio de volúmenes peatonales													
Fecha: (D.M.A.)				Hora Inicio:				Croquis:				Hoja:	
Día:				Hora Final:								De:	
Localización:				Clima:								Aforo:	
Tiempo [min]	Movimiento Aforado					Tiempo [min]	Movimiento Aforado						
	1-Vienen	Total	2-Van	Total	3-Diagonal		Total	1-Vienen	Total	2-Van	Total	3-Diagonal	Total
0						30							
1						31							
2						32							
3						33							
4						34							
5						35							
6						36							
7						37							
8						38							
9						39							
10						40							
11						41							
12						42							
13						43							
14						44							
15						45							
16						46							
17						47							
18						48							
19						49							
20						50							
21						51							
22						52							
23						53							
24						54							
25						55							
26						56							
27						57							
28						58							
29						59							

Observaciones: _____

LOGO CONTRATANTE		NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE		NOMBRE DEL ESTUDIO	
NOMBRE:		NOMBRE:		LOGO DEL CONTRATISTA	NOMBRE DEL CONTRATISTA
FIRMA:		FIRMA:			
CARGO:		CARGO:			
FECHA:		FECHA:			
ELABORÓ		REVISÓ			

Figura 6.6
Aforos de volúmenes peatonales. Formato de campo

Fuente:
elaboración propia

peatonal y para los estudios de capacidad y niveles de servicio promedio y de agrupamiento.

6.2.2.2 Estudios de velocidad de marcha peatonal

Los factores que influyen en la velocidad de marcha peatonal están relacionados con el

peatón (edad, sexo, nivel de estado físico, densidad), con la vía (pendiente, ancho del cruce), con las condiciones atmosféricas prevalecientes y la corriente de tránsito.

Las velocidades típicas de marcha peatonal están entre 0,75 a 2,0 m/s. El *Manual on Uniform Traffic Control Devices* (MUTCD, 1997, 4D7) de la Federal Highway Administration de Estados Unidos supone que la velocidad normal de marcha peatonal es 1,2 m/s, pero también sugiere hacer un ajuste a este criterio normativo cuando la velocidad predominante de marcha peatonal es menor de 1,0 m/s. Se deben hacer estudios de velocidad de marcha peatonal cuando hay un número significativo de peatones que pasan a velocidades mayores o menores de 1,2 m/s. Este es un parámetro utilizado en varios estudios peatonales por ejemplo para la aceptación de brechas en cruces escolares y estudios de fases de semáforos.

Las velocidades peatonales se evalúan por calzada. Cuando los accesos a la intersección sean de calzadas divididas con separador

central, se debe tener en cuenta que la permanencia del peatón en este elemento es una demora en el momento de cruzar la vía; por tanto, se deben registrar tiempos de recorrido independientes para cada una de las calzadas que conforman la vía en cuestión. Para diferenciar cada una de las calzadas de una misma vía se recomienda utilizar letras consecutivas, empezando con A para la calzada más cercana al observador, correspondiendo a la calzada del ramal o acceso que esté aforando. La Figura 6.7 muestra la numeración de los movimientos de los peatones y la identificación de calzadas en una intersección con separador.

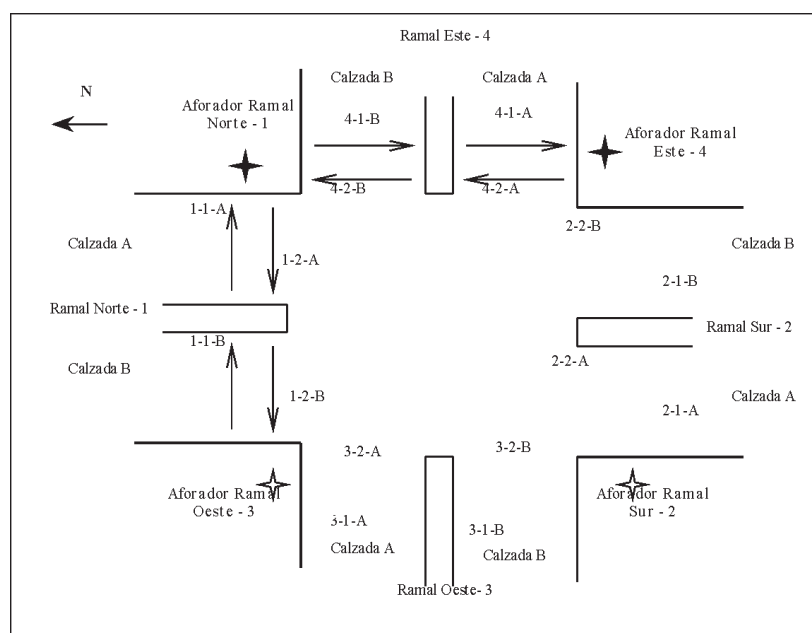
El principal objetivo de este estudio es determinar la rapidez con que circulan los peatones a través de una calle o paso peatonal.

Planeación

El estudio debe hacerse en el sitio (intersección, cruce o acera) y las condiciones de interés (períodos críticos o de máxima demanda). Normalmente este estudio se hace simultáneamente con los estudios de volúmenes peatonales para establecer mejor las características operacionales del sitio.

Se puede hacer con uno o más observadores, dependiendo de la variación de las condiciones con el tiempo y el número de clases de datos deseados. Sólo se requiere cronómetro, tabla

Figura 6.7
Codificación
movimientos
peatonales en
intersecciones
constituidas
por vías con
separador
central



Fuente:
elaboración
propia

de apoyo o planilleras, lápiz, formatos de campo y una cinta métrica para medir el ancho de los pasos peatonales.

Generalmente es suficiente una muestra de 100 observaciones para caracterizar la velocidad de marcha peatonal en un cruce.

Formato de campo

En la Figura 6.8 se presenta un modelo de formato de campo para el registro de los tiempos de recorrido que tardan las personas en pasar por el cruce peatonal.

En la Sección de identificación, se debe registrar la información temporal, anotando la fecha y día de la semana en formato día, mes y año correspondiente a la toma de la información de campo; la hora del período de aforo en formato militar (0 a 24 horas) indicando la hora de inicio, la hora de terminación y las condiciones atmosféricas prevalecientes durante la medición (buena, regular, mala, o soleado, nublado o lluvioso). También se registra la información espacial indicando la localización de la intersección o cruce mediante la dirección o la ubicación exacta. Se debe encerrar en un círculo la ubicación geográfica correspondiente del ramal (N-(1), S-(2), W-(3) o E-(4)) y anotar en metros los valores

[illegible]

Figura 6.8
Estudio de
velocidad de
caminata
peatonal.
Formato de
campo

Fuente:
elaboración propia

de los anchos medidos para cada uno de los accesos (Norte, Sur, Este u Oeste). En caso que los accesos no coincidan con estas orientaciones, se puede utilizar la combinación de las letras N, S, E y W. (ejemplo: SE, NW). Finalmente se deben escribir los nombres del aforador y supervisor y llevar la numeración secuencial de las hojas utilizadas y el total diligenciado.

En el Cuerpo del formato se tienen diez columnas donde se registran los tiempos que tardan los peatones observados en recorrer

la distancia marcada en cada uno de los accesos o movimientos. En el encabezado de cada columna se debe registrar inicialmente la codificación asignada a cada acceso de acuerdo con los criterios explicados anteriormente.

En el Pie del formato se anotan las observaciones o aclaraciones que puedan afectar los resultados del estudio, las firmas del supervisor y aforador.

Ejecución

Entre las actividades de ejecución del estudio están las siguientes: a) definir exactamente los sitios de cruce peatonal y marcar los puntos donde el peatón desciende del andén para iniciar el cruce y donde se sube nuevamente al andén o separador al otro lado de la calzada después de cruzar el paso peatonal; b) seleccionar la mejor ubicación del observador, en un sitio donde tengan un campo de visión claro y donde no distraigan a los peatones que pasan; c) capacitar a los aforadores en el diligenciamiento del formato y manejo del cronómetro y asignarles las tareas respectivas; d) distribuir los formatos, elementos y equipos necesarios y el carné de identificación.

- ♦ Los aforadores deben arribar al sitio de trabajo con anticipación para medir y registrar las distancias de cruce en cada uno de los accesos a las intersecciones o pasos peatonales y ubicarse en el sitio de observación seleccionado o más favorable.
- ♦ Al iniciar el período de estudio, se debe cronometrar y registrar simplemente el tiempo que gastan las personas individuales en recorrer la distancia medida desde el cruce o los cruces peatonales hasta completar el tamaño de muestra requerida.

Procesamiento y obtención de resultados

Los cálculos de velocidad de marcha peatonal individual se obtienen dividiendo la distancia recorrida entre el tiempo observado. Al conjunto de velocidades calculadas por ramal o acceso, por dirección o por toda la intersección, se hace un estudio de estadística descriptiva mediante un análisis de frecuencias y clasificación por clases. Finalmente se grafica el porcentaje acumulado de observaciones por clase, obteniendo una curva de velocidad acumulada, de la cual se pueden derivar varios percentiles de velocidad.

El percentil 15 es el valor generalmente aceptado para utilizar en la fase peatonal de los semáforos.

6.2.2.3 Estudio de brechas para peatones

El estudio de las brechas es un importante tema de discusión relacionado con la seguridad peatonal y de las técnicas especiales de estudio para determinar si se requieren obras de protección o controles apropiados en los cruces peatonales y especialmente en los cruces escolares, este estudio también es utilizado para los análisis de normas de las señales de tránsito.

La posibilidad de los peatones para cruzar una intersección no semaforizada depende de la distribución de brechas en el tráfico, ya que si no ocurren con frecuencia brechas adecuadas, los peatones deberán soportar demoras inaceptables o arriesgarse a cruzar la calzada, ocasionando conflictos o accidentes indeseables. Los principales objetivos de este tipo de estudio son:

- ♦ Determinar el tamaño del grupo predominante que atraviesa una zona peato-

nal, necesario para el cálculo de la brecha mínima segura.

- ♦ Medir las brechas disponibles en la corriente de tráfico, que permitan el cruce seguro de los peatones.
- ♦ Determinar la eficiencia del cruce o el factor de demora para la evaluación respectiva.

Se ha observado que los peatones que esperan cruzar una calzada generalmente se ubican en fila uno detrás de otro y tienden a formar grupos de varios tamaños. Los grupos se forman naturalmente cuando las brechas son inadecuadas para acomodar llegadas aleatorias. La determinación del tamaño predominante de grupos de peatones se hace por el ancho de la fila y el número de filas por grupo. Normalmente se asume que al iniciar el cruce, bajan del andén y caminan en grupo con filas de cinco, separadas entre sí por un intervalo de dos segundos.

Puesto que el factor de interés es la cantidad de tiempo que toma el grupo entero para entrar al cruce, sólo es necesario determinar el número predominante de filas que esperan cruzar cuando inicia el tiempo de cruce. El ancho de la fila y el número total de peatones en el grupo es insignificante. Al comienzo es difícil distinguir las distintas filas. Sin embargo con algún entrenamiento y experiencia, los observadores lo manejan fácilmente.

Planeación

El estudio se hace en los cruces escolares o peatonales donde no existan semáforos, y se tenga planeado diseñar y construir mejoras de seguridad peatonal. Estas medidas deben hacerse durante el tiempo y en las condiciones de interés, que normalmente corresponden a las horas críticas de máxima demanda.

Se requiere un observador por paso peatonal. Para la observación del tamaño del grupo predominante es suficiente asignar un aforador por cada cruce o paso peatonal que se esté analizando.

Como equipo, se requieren los formatos de campo, lápiz, borrador, tabla de apoyo y un cronómetro para leer la hora y duración del aforo.

Usualmente es suficiente una muestra de 30 a 50 grupos para establecer el tamaño del grupo (número de filas por grupo).

Formato de campo

La mitad superior del modelo del formato de campo que aparece en la Figura 6.9 se utiliza para determinar el tamaño predominante del grupo.

En la sección de identificación se registra la fecha y el día de la semana correspondientes a la realización del estudio, la ubicación o localización de la intersección, el ancho de la calzada o paso peatonal en metros (distancia de sardinel a sardinel), la velocidad de marcha peatonal obtenida en el sitio, las condiciones climática imperantes durante el período de observación, las horas inicial y final y los nombres del aforador y supervisor del estudio.

En el cuerpo del formato se registra el conteo de filas de peatones, colocando una raya en la columna de Aforo correspondiente al Número de filas observadas en el grupo que cruza la calzada o paso peatonal. Una vez finalizado el estudio o recolectado el tamaño de muestra requerido, se registra en la columna Total el número correspondiente al conteo del número de rayas en cada renglón, que representa la frecuencia de cada tamaño de grupo observado. También se debe calcular el valor acumulado.

Figura 6.9
Estudio de
rechaz para
peatones.
Formato de
campo

[illegible]

Fuente:
elaboración propia

mero de filas observadas en cada grupo que cruza la calzada o paso peatonal en estudio y registrarlo en la parte correspondiente del formato de campo. No se deben incluir los rezagados. Cuando se completa el período de muestreo del grupo, se totalizan las observaciones y se entrega al supervisor.

Ejecución

Una vez finalizado el estudio, en el formato de campo, se suma la columna Total y ese resultado será el número de grupos muestreados (Σ). Se calcula también el número acumulado para cada tamaño de grupo en la columna Acumu-

lado del formato. Obviamente, la suma total (Σ) debe ser igual al último valor de la columna Acumulado.

Para definir el número predominante o número de filas del grupo, generalmente se adopta el percentil 85%. Para calcularlo, se multiplica el número total de grupos muestreados (Σ) por 0.85 (si se desea se puede utilizar otro percentil). Se ubica este resultado interpolándolo en la columna Acumulado y luego se lee en la columna Número de fila, el

valor que corresponde al número predominante de filas (N).

El conocimiento del tamaño predominante del grupo permite calcular la brecha mínima segura, como se enuncia a continuación.

Procesamiento y obtención de resultados

La brecha mínima aceptable o segura es el tiempo mínimo de brecha vehicular que debe estar disponible en la corriente de tránsito para permitir el cruce de peatones sin ocasionar interferencias ni peligro potencial a ninguna de las partes en conflicto. Este valor es una función del ancho del cruce, la velocidad de marcha peatonal, el número predominante de filas en el grupo, el intervalo de tiempo entre filas y el tiempo de arranque del grupo al iniciar la maniobra de cruce. Si la vía que se cruza se divide con un separador central que le brinda seguridad al peatón, se debe determinar la brecha mínima aceptable para cada mitad del cruce.

El cálculo de la brecha mínima segura se obtiene con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{W}{S} + (N-1)H + R \quad 6.1$$

donde,

G = brecha mínima segura en el tránsito [s]

W = distancia de cruce o ancho de la calzada [m]

S = velocidad de marcha peatonal [m/s]

H = tiempo de intervalo entre filas [s]

R = tiempo de arranque del peatón [s]

Los valores asumidos más corrientemente para algunos de estos valores son:

$$S = 1.0 - 1.2 \text{ m/s. } H = 2 \text{ s } R = 3 \text{ s}$$

El resultado se redondea al segundo más próximo. Los cálculos se hacen en la parte inferior de formato de campo para la determinación de brecha peatonal.

6.2.2.4 Medición de brechas disponibles en la corriente del tránsito

La siguiente parte del estudio de campo es medir las brechas disponibles en la corriente el tráfico durante el período de estudio, pero solamente interesan las brechas que exceden a la brecha mínima segura; por tanto, no es necesario registrarlas todas.

Planeación

Se debe hacer un muestreo en el punto de cruce para la dirección más cargada. El observador debe colocarse, sin causar obstrucción, perpendicular al cruce y paralelo a la calzada con una vista clara del punto de cruce. El día y la hora se selecciona en el período donde se presentan los conflictos de peatones con el tránsito vehicular.

Para el estudio de brechas se requiere un observador por cada punto de cruce que se va a estudiar. Solamente se requiere cronómetro, lápiz, borrador y formatos de campo.

El tamaño de la muestra se calcula según el tipo de aplicación para el cual se utiliza el estudio de brechas. Por ejemplo, en el Manual anterior se especifica que para justificar la instalación de semáforos se requiere, además de volúmenes mínimos de peatones, que haya menos de 60 brechas por hora en la corriente de tránsito con una duración adecuada para el cruce de peatones, durante el mismo período cuando se cumple el criterio de volúmenes peatonales. Esto implica una duración mínima del estudio de una hora.

Ejecución

El observador se ubica en el sitio de cruce en una posición perpendicular al sentido del tráfico. El observador puede desarrollar un sentido de apreciación para las identificar las brechas que están cerca o exceden a la brecha mínima segura, observando la distancia y la velocidad entre vehículos mientras mide el tiempo de las brechas. Con alguna experiencia el observador será capaz de captar la mayoría de las brechas adecuadas.

Formato de campo

El formato de campo que se utiliza para el registro de las brechas disponibles en el tránsito corresponde a la mitad inferior del modelo de formato mostrado en la Figura 6.9. En la Sección de identificación se debe registrar la fecha y el día de la semana, las condiciones climáticas imperantes y las horas de inicio y terminación correspondiente a la realización del estudio. También se debe registrar la información correspondiente a la identificación de la calzada y el número de carriles existentes. Al finalizar el trabajo de campo, puede obtener la duración total (T) mediante la diferencia entre la hora inicial y la hora final del estudio.

En el cuerpo del formato, el observador debe registrar cada brecha medida en forma individual con cronómetro y contabilizar sólo las mayores que la brecha mínima segura calculada (G). Para tal fin se marca una raya en la columna de Aforo de brechas, correspondiente al tamaño de brecha medida. Este tamaño se redondea al segundo más próximo.

En el pie del formato aparecen unas líneas para registrar las observaciones o aclaraciones que se consideren relevantes y que puedan servir de explicación a situaciones

anormales o de justificación de los datos recolectados. Los formatos deben llevar la firma del supervisor y del aforador.

Procesamiento y obtención de resultados

Una vez finalizada la etapa de toma de información de campo, en la mitad inferior del formato de campo (Figura 6.9) se suman las rayas para cada tamaño de brecha, que fueron registradas en la columna Aforo de brechas y se registra el número correspondiente en la columna Total. La suma de los totales (para los tamaños de brechas mayores o iguales a la brecha mínima segura G) es el número de brechas de longitud suficiente para acomodar el cruce seguro del 85% de los grupos de peatones en el día y hora y bajo las condiciones similares del estudio.

Luego se calcula la columna Tiempo total multiplicando el valor de la columna Tamaño de brecha por el número de brechas observadas de ese tamaño en la columna Total, para los tamaños de brecha mayores o iguales a la brecha mínima segura (G). La suma de la columna total es el valor del tiempo total (t) de las brechas con una duración mayor o igual a la brecha mínima segura.

Para evaluar la efectividad del cruce peatonal se utiliza como medida el factor de demora (D), el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$D(\%) = 100 \left(\frac{T-t}{T} \right) \quad 6.2$$

donde

- $T =$ tiempo total del estudio de brechas [s]
- $t =$ tiempo total de las brechas con una duración mayores o iguales a la brecha mínima segura [s]

El factor de demora (D) se calcula en la parte inferior del formato de campo. Para decidir la necesidad de tomar medidas de control o mejoras en el cruce, existen dos criterios:

Aplicación del factor de demora (D)

En un cruce escolar sin control semaforizado, los niños usualmente son bastante impacientes. Un factor de demora mayor de 10 a 15% generalmente indica la necesidad de alguna forma efectiva de protección al cruce escolar. Se requiere hacer un estudio más completo para analizar la posibilidad de semaforizar el cruce, de acuerdo con las justificaciones que existen para el efecto.

Número de brechas adecuadas

Es el número de brechas que igualan o exceden la brecha mínima segura, observadas durante el estudio de medición de brechas en la corriente del tránsito. Se debe recomendar un semáforo en cruces de escolares cuando, además del requisito de volúmenes peatonales, el número de brechas adecuadas disponibles en la corriente de tránsito sea menor que el número de minutos correspondiente a la duración del respectivo estudio. Es decir, si en un estudio con duración de una hora (60 min), se presentan menos de 60 brechas adecuadas, se cumple esa justificación para la semaforización del cruce peatonal.

6.2.2.5 Estudio del comportamiento de peatones

Para refinar las consideraciones de diseño, en las medidas de control y mejoramiento de la seguridad peatonal es necesario realizar

estudios para analizar el comportamiento de peatones.

Para que un comportamiento sea útil en el análisis de tránsito, debe tener ciertas características:

- ♦ Estar definido en términos de objetivos o eventos observables y que la codificación sea confiable.
- ♦ Ocurrir con suficiente frecuencia, que permita una programación eficiente de recolección de datos.
- ♦ Estar relacionado con la seguridad o el flujo peatonal, ya sea de forma teórica, empírica o asumida.

Los estudios de comportamiento del peatón pueden agruparse en tres grandes categorías.

- ♦ Conflictos vehículo–peatón.
- ♦ Entendimiento y obediencia de los dispositivos de control de tránsito.
- ♦ Comportamiento exhibido.

La preparación de la recolección de datos del comportamiento peatonal se hace a través de observaciones manuales o de filmación. El método manual es más utilizado debido a los costos de reducción. Si los comportamientos son difíciles de observar, la filmación es el único medio factible. Se deben diseñar los formatos para la recolección de datos en cada estudio específico.

El entrenamiento de los observadores es tal vez el aspecto más crítico para los estudios de comportamiento. Los comportamientos se deben codificar en función del comportamiento observado de vehículos y peatones. Debe existir una confiabilidad correlativa con cada código que representa el mismo comportamiento. Para el patronamiento o calibración del personal de campo se utilizan videos; se destinan dos observadores a

recolectar datos en el mismo sitio, se comparan los resultados y se evalúan las diferencias resultantes con un observador experimentado. Los observadores habrán alcanzado la práctica cuando lleguen a un nivel de coincidencia de 95%.

Para garantizar una adecuada recolección y análisis de datos, el ingeniero debe supervisar esta actividad, velando por el cumplimiento de la programación y los horarios. Los observadores se deben relevar constantemente para evitar la fatiga y errores continuos en el juicio. Los observadores deben fijarse cuidadosamente en las condiciones en los sitios de recolección de datos para prevenir un evento atípico o situación que confunda el estudio. Se debe confirmar la causa del cambio de comportamiento de los peatones y los vehículos. El análisis de datos debe seguir un plan preconcebido. Muchos estudios de comportamiento se hacen para los estudios de antes y después de la incorporación de un tipo de control. Se recomienda acudir a los servicios de un experto en estadística.

Los principales objetivos son:

- ◆ Suministrar una mejor comprensión de las necesidades de los peatones
- ◆ Identificar las relaciones entre los factores humanos, críticas para la seguridad y movilidad peatonal.

Ejecución

Los conflictos que se presentan entre vehículos y peatones incrementan la potencialidad de ocurrencia de los accidentes. Los conflictos peatón/vehículo son una medida útil para comparar las diferencias relativas entre las medidas alternativas de seguridad peatonal. Muchos estudios han utilizado los conflictos como una medida de efectividad

para identificar los problemas de seguridad peatonal, para evaluar los dispositivos de control de tránsito y para comparar los diseños de las mejoras peatonales.

Los peatones que cruzan una calle pueden encontrarse con vehículos que giran a la derecha o a la izquierda. Ocurren tres conflictos básicos cuando la trayectoria de los peatones se cruza con la de los vehículos, o cuando deben cambiar de dirección o velocidad para evitar la colisión: la intensidad de la deceleración o aceleración, la diferencial de velocidades y la cercanía de las partes involucradas.

Entendimiento y obediencia

El no acatamiento de las señales de tránsito puede deberse al desconocimiento de la señal, a la ignorancia de la norma o simplemente a la indisciplina o desobediencia inherente al nivel de cultura de tránsito. Muchas personas entienden los dispositivos, pero los ignoran. La obediencia es un indicativo del grado de entendimiento del peatón, particularmente cuando se complementan con otras medidas coercitivas como el control policivo.

Una manera sencilla de determinar si los peatones comprenden o entienden los dispositivos del control de tránsito es la realización de encuestas con preguntas específicas.

Otra manera de determinar si los peatones comprenden las medidas, es observar y registrar la obediencia de los peatones a los dispositivos de control y el cumplimiento de las normas de tránsito. Tanto los vehículos como los peatones pueden pasar un semáforo en rojo, no obedecer a una señal de Pare, adelantarse a una señal de verde, o iniciar el cruce durante un claro o indicación de señal prohibida. La obediencia normalmente se mide por observación y registro de las violaciones.

La obediencia es un indicativo del grado de comprensión del peatón. La obediencia normalmente se mide por observación y registro de las violaciones a las normas de tránsito.

El marco conceptual y el método de este estudio son similares al presentado anteriormente: Estudios del comportamiento de los conductores en intersecciones, y el formato utilizado se ilustra en la Figura 6.10.

Comportamiento exhibido

El estudio del comportamiento peatonal exhibido en los espacios compartidos con la corriente vehicular ha demostrado alguna confiabilidad para identificar los problemas y evaluar las medidas de seguridad.

Ejemplos de estos comportamientos, pueden ser: no ver a la izquierda ni a la derecha antes y durante el cruce, titubear en la calzada al hacer el cruce, correr y retornar al andén después de iniciar el cruce, etc. Estas actitudes representan acciones indeseables ya que reflejan algún grado de amenaza al peatón. Se recomiendan que los controles y mejoras peatonales reduzcan estos comportamientos en pro de la seguridad.

Para escoger las medidas de efectividad, se tienen en cuenta los propósitos y objetivos del estudio, la ubicación y condición del sitio del estudio y de los recursos (tiempo y dinero) disponibles. No es nece-

sario incluir todos los tipos de medidas de comportamiento.

6.2.3 Equipos modernos para observación y aforos peatonales

Hay algunas aplicaciones de conteos peatonales que requieren clasificaciones simples, pero hay otras tan complejas que requieren el uso de equipos especiales o que deben ser filmadas para hacer el análisis en cámara lenta.

Recientemente las videograboras han reemplazado las filmaciones, ya que proveen un medio confiable y preciso para el registro de volúmenes, así como de otros datos, pero

Comportamiento de los peatones ante los semáforos					
Fecha: (D.M.A.)		Hora Inicio:		Croquis:	
Clima:		Hora Final:		Hoja:	
Localización:		Ancho Acceso:		De:	
Ramal:		Cruce Peatonal:		Acceso:	
				Sentido:	
BAJAN DEL ANDÉN EN:		CRUCE DIRECTO			TOTAL
Fase Semáforo	Fase Peatonal				
Rojo	Pase				
Amarillo	Intermitente No pase				
Verde	Fija No pase				
CRUCE DIAGONAL					
Rojo	Pase				
Verde o amarillo	No pase				
TOTAL					
Observaciones:					
LOGO CONTRATANTE	NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE			NOMBRE DEL ESTUDIO	
NOMBRE:		NOMBRE:			
CIUDAD:		CIUDAD:			
CARGO:		CARGO:			
FECHA:		FECHA:			
ELABORÓ		REVISÓ		LOGO DEL CONTRATISTA	NOMBRE DEL CONTRATISTA

Figura 6.10
Estudio del comportamiento peatonal ante las indicaciones del semáforo. Formato de campo

Fuente: elaboración propia

tienen el inconveniente que requieren gran cantidad de tiempo para la reducción de datos en oficina.

Los conteos simples que se necesitan para períodos largos de tiempo (días, semanas o aún meses) en sitios distantes de la vía o del paso peatonal, requieren gran número de observadores, cuyos costos pueden resultar prohibitivos. Cuando se requieren clasificaciones complejas de procedimientos y acciones (por ejemplo, movimientos de cabeza), éstos pueden ser muy rápidos para que el aforador los observe y los registre. Las grabaciones de video suministran un medio para reunir estos datos de peatones a un costo razonable de tiempos y recursos.

6.2.3.1 Equipos electrónicos de conteo

Los últimos dispositivos para facilitar la toma de datos de peatones son los equipos o computadores portátiles operados con baterías, que funcionan de manera similar a los contadores mecánicos, con pocas diferencias, pero son más compactos y fáciles de manejar. Tienen incorporado un reloj interno que separa los datos por los intervalos de tiempo seleccionados, facilitando la etapa de reducción de datos y la totalización. Los datos se pueden enviar directamente del campo al computador de la oficina vía módem, o transferirlos al computador una vez se regrese del campo. Cualquiera que sea el método de transferencia, existe software que permite el resumen, análisis y presentación adecuada de los resultados de los datos de aforos. Muchos equipos electrónicos pueden manipular varios tipos de estudios de tránsito, incluidos datos de conteo de peatones, clasificación, brechas, aceptación de brechas y estudio de comportamiento de peatones. Estos equipos

son una herramienta efectiva cuando se requiere realizar estudios constantemente.

Se debe tener especial cuidado cuando se usen equipos electrónicos o computadores portátiles para garantizar que estén correctamente orientados al esquema geométrico y ubicados geográficamente en la intersección.

Las brechas también se pueden medir usando equipos electrónicos de conteo u utilizando computadores portátiles en lugar de cronómetros y hojas de campo. El procedimiento es esencialmente el mismo. El reloj interno del computador registra el tiempo. Los observadores pulsan el botón adecuado para registrar la brecha en el tráfico. La ventaja principal de esta técnica es que el software de computador reduce los datos, lo que representa un gran ahorro tiempo y precisión en los resultados.

Desde el punto de vista de procedimiento de campo, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ♦ Personal requerido. Solo se requiere el personal para la instalación y retiro del equipo. La brigada de campo consta de una o dos personas únicamente.
- ♦ Selección del sitio de conteo. La calle o autopista en la cual se hará el conteo, la ubicación general a mitad de cuadra o en la intersección donde se colocarán las cámaras se decide en la oficina y es una función del tipo de estudio a ejecutar. La ubicación exacta de las cámaras, los registradores de conteo y los sensores usualmente se define en el campo. En el caso de las cámaras el factor más importante es el campo de visión. La ubicación de la cámara debe tener en cuenta las adversidades del clima y la reducción de la visibilidad por las sombras.
- ♦ Instalación y retiro. El aspecto principal durante la instalación y retiro es la seguri-

dad de la brigada de campo. La mayoría de los equipos automáticos instalados para el registro de datos peatonales se sitúa en los andenes o caminos lejos de la calzada vehicular. El vehículo de la brigada de campo debe permitir buena visibilidad al tráfico y parquearse lejos de la calzada con circulación. Los miembros de la brigada deben usar chalecos reflectivos durante todo el tiempo. La instalación y el retiro de los equipos debe hacerse durante el periodo de bajos volúmenes de tráfico y buena visibilidad. Las técnicas de instalación varían y se encuentran disponibles en los catálogos del fabricante del producto. El segundo aspecto es la seguridad de los equipos de registro de datos. La mayoría de los contadores automáticos se pueden asegurar físicamente a árboles, postes de luz o postes de semáforos. La cámara se maneja manualmente. Además, para garantizar la toma exitosa de la información, el operador debe cambiar las cintas o películas y asegurarse que la cámara esté orientada y enfocada apropiadamente durante la grabación o recolección de los datos.

- ♦ Reducción y análisis de datos. Los tableros de conteo electrónico o computadores portátiles terminan la etapa de reducción de datos y producen automáticamente los datos en un cuadro resumen.

6.2.3.2 Equipos automáticos de conteo

Hay varios tipos y modelos de equipos automáticos de recolección de datos de volúmenes. Estos equipos normalmente incluyen los componentes básicos, sensores para detectar la presencia del peatón y un registrador de datos. Los sensores pueden emplear transmisión y detección de luces infrarrojas,

fotoceldas, almohadillas de presión o dispositivos sensibles al calor. Hasta la fecha ninguno de estos equipos han dado resultados aceptables para los diferentes usos comunes en áreas distantes.

6.2.3.3 Estudio del medio ambiente peatonal

El propósito de los estudios del medio ambiente peatonal es investigar cómo experimentan los peatones su medio ambiente y cómo caracterizan lo bueno y lo malo. El estudio se lleva a cabo mediante entrevistas. Primero se pregunta a la gente el nombre de un sitio bueno y un sitio malo desde el punto de vista del peatón; luego, para validar su elección, se cruza la información con una selección de comentarios que se le ofrecen. Se debe aplicar un número de encuestas representativas desde el punto de vista estadístico. La información se procesa utilizando un análisis de factores para separar los diferentes tipos de las variables y determinar qué variables describen mejor un medio ambiente peatonal bueno y cuáles uno malo. En Helsinki, el análisis dedujo cuatro factores que describen las características medioambientales de la ciudad.

- ♦ El primer factor se denominó Factor de ciudad, que incluye elementos como las luces de neón, vitrinas de compras, gente joven, etc.
- ♦ El segundo factor es el Factor de perturbación del tránsito, que incluye el ruido del tránsito, la dificultad de movilizarse con los niños, los caminadores y los discapacitados, etc.
- ♦ El tercero es el Factor de ordenamiento del tránsito, que incluye los elementos de gestión del tránsito, como la localización y la conveniencia de los cruces peatonales.

- ◆ El último factor es el Factor social, que incluye la influencia de las otras personas y la atracción ambiental.

Los factores descritos dan una idea de un pronóstico grueso acerca de las cosas agradables (medio ambiente aceptable) y desagradables (no aceptable) de cierto entorno ambiental desde el punto de vista del peatón. La mayoría de las justificaciones que se dan para calificar un medio ambiente agradable para el peatón está asociada a la tranquilidad, los árboles y plantas, los almacenes, las vitrinas y atmósferas llenas de color.

En el estudio de Helsinki, la justificación más frecuente para ponderar un lugar desagradable fue, sorprendentemente, un elemento del factor social: encontrar personas no sociables. Otro elemento mencionado fue la densidad el tránsito, la dificultad para viajar a pie y el ordenamiento del tránsito. Por encima del 40% de las justificaciones estuvieron asociadas al tránsito y a los ordenamientos del tránsito. Los aspectos estáticos del medio ambiente, como los edificios fueron de menor importancia. Los resultados del estudio muestran de manera clara que se debe poner la mayor atención al ordenamiento del tránsito para mejorar el rol del peatón en el tránsito. En principio, el segundo esfuerzo debe dirigirse hacia al mejoramiento del ambiente social.

6.3 Estudios para bicicletas

Los estudios para bicicletas están orientados a conocer el comportamiento y desempeño de los ciclistas en la red de ciclorrutas de la ciudad. La caracterización del comportamiento de los ciclistas generalmente se hace mediante la cuantificación de estos parámetros:

- ◆ Volúmenes.

- ◆ Velocidad de recorrido.

En este numeral se tratarán aspectos relacionados con la recolección de información de volúmenes de ciclistas y toma de velocidades en ciclorrutas. Con el propósito de tener una mayor claridad, a continuación se describen los procedimientos de campo y los diferentes formatos requeridos para la recolección de la información y la presentación de los resultados obtenidos. También se pretende dar a conocer las técnicas empleadas en la recopilación de información de campo sobre volúmenes de ciclistas, así como indicar los procedimientos para el procesamiento y presentación de los resultados de un estudio cualquiera.

6.3.1 Volúmenes de bicicletas

El objetivo primordial de aforar los volúmenes de ciclistas en ciclorrutas es determinar la demanda de tránsito que pasa una sección transversal o una intersección de la red durante un período determinado, la cual se puede emplear en actividades de diagnóstico, planeamiento, diseño e investigación.

Con un estudio de este tipo, se determina la variación horaria de los volúmenes de ciclistas, así como la distribución direccional. También sirve para conocer la distribución de los flujos y movimientos (en caso de intersecciones) a través de la cuantificación de los volúmenes por tipo de movimiento.

6.3.1.1 Planeación

La información obtenida a través de estos estudios sirve para clasificar de manera sistemática la red de ciclorrutas y para tener modelos de asignación y distribución del tránsito. Se pueden desarrollar programas de conservación, mejoramiento, rehabilita-

ción y prioridades, así como análisis económicos.

Algunos factores asociados a los volúmenes de ciclistas pueden ser:

- ◆ El tiempo
- ◆ La intensidad por sentido
- ◆ El propósito del viaje
- ◆ Frecuencia de viajes
- ◆ Preferencias de rutas

Una correcta planeación debe incluir visitas a todos los puntos seleccionados para realizar los aforos con el objeto de establecer plenamente las características de las vías a evaluar y determinar la ubicación propicia de cada aforador, teniendo en cuenta que el conteo se va a realizar en la ciclorruta existente y, de ser necesario, en las calzadas y andenes de la vía donde ésta se encuentra ubicada. Estas visitas también se hacen con el objeto de poder determinar el número de ciclistas que efectivamente utilizan las diferentes infraestructuras.

El método está planteado para utilizar personal de campo en su realización, y tiene la ventaja que permite obtener información detallada sobre:

- ◆ Movimientos direccionales en una intersección o en un acceso.
- ◆ Dirección de recorrido.
- ◆ Uso de carriles y/o longitud de colas.
- ◆ Obediencia a los dispositivos para el control del tránsito.

6.3.1.2 Ejecución

Una vez planeada la toma de información y definidos sus puntos de aforo, el siguiente paso a seguir es definir el período de conteo, el cual no debe comprender condiciones en las que se presenten eventos especiales, a

menos que se desee estudiar específicamente esa situación.

Para aforar volúmenes de bicicletas se pueden presentar dos condiciones. La primera es realizar aforos en una intersección; la segunda, en un tramo de ciclorruta. La recolección de información para estos dos elementos es muy similar, ya que sólo se cambiarán los sentidos y movimientos de circulación, según sea el caso.

Como se mencionó, la visita preliminar permite elaborar un esquema de la intersección o del segmento con su geometría general, los movimientos vehiculares y el cuadro de fases donde se relaciona la secuencia de los diferentes movimientos. Además, se debe analizar visualmente la magnitud del tráfico de ciclistas por movimiento para determinar en el sitio la cantidad de personal requerido y su ubicación estratégica para facilitar la toma de la información.

Capacitación del personal

Durante la etapa de planeación, se recomienda realizar una fuerte labor de capacitación del personal, haciendo énfasis en un alto sentido de pertenencia del estudio, lo cual redundará en la obtención de información confiable. Se debe inculcar la importancia de mantener la ubicación correspondiente durante la recolección de la información, ya que da una adecuada visibilidad sobre la vía aforada.

También se recomienda que los trabajos de campo se realicen preferiblemente con estudiantes universitarios de carreras afines, a los cuales se les puede explicar más en detalle el alcance de los estudios y la importancia que la información de campo corresponda efectivamente a la realidad, ya que si éstos registran datos erróneos, los análisis realizados con esta información arrojarán resultados erróneos.

Equipo necesario

Cada aforador debe ser dotado del material y equipo necesario para la eficiente recolección de la información. En el caso de aforos manuales, la dotación consiste en:

- ◆ Chaleco
- ◆ Planillera
- ◆ Reloj digital
- ◆ Formatos
- ◆ Bolígrafo lápiz
- ◆ Escarapela de identificación

Cada supervisor de zona debe hacer recorridos periódicos para tener un mayor control sobre la calidad de la información. Además, cada uno de estos monitores tendrá dotación de reserva adicional.

Toma de información

La información de campo se registra en formatos previamente diseñados según el lugar del aforo, en períodos de 15 minutos, clasificándolos de acuerdo con el tipo de movimiento (directo, giro a derecha y giro a izquierda), si es en una intersección, a medida que van entrando en ella. Si la toma de información es en un tramo recto de ciclorruta, la clasificación se realizará de acuerdo con el sentido de circulación.

Según la magnitud del tráfico de ciclistas, los registros se realizan en forma individual anotando en cada casilla el número aforado de ciclistas en cada período y en cada dirección.

Posteriormente, la recolección de la información se llevará a cabo durante el período previamente establecido, teniendo en cuenta que cada aforador debe llegar a su punto de trabajo 15 minutos antes del inicio de los conteos para garantizar la toma de información en la totalidad del período de estudio.

La recolección parcial de la información estará a cargo de los supervisores de cada área, los cuales se comunicarán con la dirección del proyecto para ir informando del desarrollo de los trabajos e ir entregando información parcial.

Formatos de campo

Para realizar la planeación del estudio y del personal de campo se puede utilizar un formato que, además de toda la información de identificación del punto, disponga de una casilla para realizar la asignación de personal de acuerdo con el movimiento a registrar. En el caso que se vaya a aforar en una intersección, debe existir un espacio para realizar un esquema de ésta, el cual debe incluir la geometría básica y la identificación de todos los movimientos direccionales y las fases de los semáforos, si está controlada por este tipo de dispositivo. Para calcular el número de aforadores, se recomienda estimar los volúmenes que se pueden presentar en el punto.

En este esquema también se puede identificar la posible ubicación de los aforadores, desde la cual se debe observar completamente el volumen existente e identificar claramente el paso de los ciclistas, según el lugar donde se realizarán los aforos; por ejemplo, en ciclorrutas, calzadas vehiculares o accesos en una intersección. En las Figuras 6.11 y 6.12 se muestran los formatos recomendados para cada caso explicado anteriormente.

Es válido aclarar que la configuración de estos formatos es flexible y puede adaptarse a las necesidades de cada caso específico.

6.3.1.3 Procesamiento y obtención de resultados

Una vez recogida la información se realiza una depuración manual en el formato de

campo confrontando sumas de filas y de columnas para detectar posibles errores aritméticos de los aforadores.

Posteriormente, para procesar esta información, se digitan los datos en una hoja de cálculo, en la que se pueda identificar claramente cada uno de los movimientos aforados de la intersección o del tramo, según el período. Esta información permite obtener los siguientes resultados:

- ◆ Se puede determinar el máximo volumen de tránsito registrado durante el período del estudio, a través del cual se puede identificar la hora pico. Se expresa en bicicletas por hora.
- ◆ De ser necesario, también puede establecerse el volumen mínimo de tránsito registrado durante el período del estudio, se establece la hora de menor demanda. Sin embargo, este valor se debe obtener de aforos realizados en horas valle. Se expresa en bicicletas por hora.
- ◆ El volumen total de tránsito se registra para todo el período del estudio o del día por dirección de movimiento. Se expresa en bicicletas dividido por el período del estudio.
- ◆ La distribución horaria del tránsito permite conocer como varía el volumen

de ciclistas durante el período del día aforado.

- ◆ El factor de hora pico, FHP, el cual se calcula a través de la siguiente expresión:

$$FHP = \frac{\text{Volumen hora pico}}{4 * (\text{Volumen máximo en 15 minutos})}$$

Procesamiento de la información

Una vez revisada la información de los formatos y verificado el correcto diligenciamiento de éstos, se procede a digitar usando una hoja electrónica, preferiblemente. Digitada la información, se realiza una segunda depuración contra los formatos de campo

ESTUDIO DE TRANSITO EN CICLORRUTAS		
Formato de planeación		
Fecha:		Supervisor:
Hora inicio:	Periodo de Estudio:	
Hora final:		
Aforador No.	Movimiento	Nombre
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
ESQUEMA DEL TRAMO O INTERSECCIÓN		
Observaciones:		
ENTIDAD CONTRATANTE	PROYECTO	ENTIDAD CONTRATISTA

Figura 6.11
Programación
de personal y
esquema de la
intersección.
Formato de
campo

Fuente:
elaboración propia

Figura 6.12
Volúmenes de
bicicletas

[illegible]

Fuente:
elaboración propia

verificando la veracidad de las bases de datos finales.

Según el objeto del estudio, se entrega la siguiente información para cada punto:

- ◆ Gráfico del punto de aforo.
- ◆ Cuadro resumen de volúmenes por hora pico por sentido, discriminando los usuarios y no usuarios de la ciclorruta (si se incluyen).
- ◆ Gráficos con los volúmenes horarios durante los períodos de aforo discriminando usuarios y no usuarios de la ciclorruta.

6.3.2 Velocidades de bicicletas

En el presente documento se darán los principales lineamientos para determinar la velocidad promedio de los usuarios de la red de ciclorrutas que transitan por diferentes corredores Bogotá, D.C.

6.3.2.1 Planeación

En esta etapa, se deben realizar visitas a todos los puntos seleccionados para realizar los aforos con el objeto de establecer plenamente las características de las vías a evaluar y determinar la ubicación propicia de cada aforador.

6.3.2.2 Ejecución

Una vez planeada la toma de información y definidos sus puntos de aforo, el siguiente paso es determinar el período de conteo, el cual no debe comprender

condiciones en las que se presenten eventos especiales, a menos que se desee estudiar específicamente esa situación.

Capacitación del personal

Durante la etapa de planeación, se recomienda una fuerte labor de capacitación del personal, haciendo énfasis en un alto sentido de pertenencia del estudio, lo cual redundará en la obtención de información confiable. Se debe inculcar la importancia de mantener la

ubicación correspondiente durante la recolección de la información, ya que ésta les da una adecuada visibilidad sobre la vía aforada.

También se recomienda que los trabajos de campo se realicen preferiblemente con estudiantes universitarios de carreras afines, a los cuales se les puede explicar más en detalle el alcance de los estudios y la importancia que la información de campo corresponda efectivamente a la realidad, ya que si éstos registran datos erróneos, los análisis que se realicen con esta información arrojarán resultados erróneos. Se les hace saber la importancia de mantener la ubicación correspondiente durante la recolección de la información, ya que ésta les da una adecuada visibilidad sobre la vía.

Equipo necesario

Cada aforador debe ser dotado del material y equipo necesario para la eficiente recolección de la información. En el caso de aforos manuales, la dotación consiste en:

- ◆ Chaleco
- ◆ Planillera
- ◆ Reloj digital
- ◆ Formatos
- ◆ Bolígrafo o lápiz
- ◆ Escarapela de identificación
- ◆ Escarapelas codificadas para las bicicletas

Cada uno de los supervisores tendrá dotación de reserva adicional.

Ejecución

Para la toma de datos de velocidad de las bicicletas, se implementó el método conocido como de las “papeletas”. Este método consiste en la ubicación de un pequeño cartel o papeleta en alguna parte visible de la bicicle-

ta y dos aforadores por sentido en el tramo seleccionado. Esta papeleta debe llevar un número o código que puede ser secuencial o no. Una vez se entregue la papeleta a un ciclista, el primer aforador anotará el código de ésta y la hora de entrega. Al llegar al final del tramo en estudio, la papeleta debe ser recogida por el segundo aforador, que consignará la hora de llegada y el código.

Para cada tramo, se realizará este procedimiento en cada sentido. Esta información se anotará en las planillas diseñadas para tal efecto.

En cada vía se debe asignar un supervisor, encargado de recoger la información cada hora en el respectivo tramo. En cada uno de los sectores se deberán distribuir cuatro aforadores, dos por cada sentido.

Se recomienda que los dos aforadores tengan algún tipo de comunicación para evitar, en lo posible, la pérdida de las papeletas, ya que este fenómeno ocurre con mucha frecuencia. También deben sincronizar sus relojes o disponer de cronómetros digitales. Si no es posible obtener la papeleta codificada, el aforador identificará el número de ésta y anotará la hora de paso del usuario.

En cuanto a la ubicación de los aforadores, se recomienda que sea en intersecciones (preferiblemente) semaforizadas, inicio de tramos de ciclorruta, puntos de ingreso a la red y en general, donde el ciclista deba hacer una parada obligatoria en su recorrido. Esta detención momentánea del ciclista facilitará la labor del aforador para instalar la papeleta con el código.

Formatos de campo

Para realizar la planeación del estudio y del personal de campo se puede utilizar el mismo formato mostrado en la Figura 6.11.

En este esquema también se puede identificar la posible ubicación de los aforadores, desde la cual se debe observar el volumen existente e identificar claramente el paso de los ciclistas. En la Figura 6.13 se muestra el formato recomendado para la recolección de información de velocidades.

Es necesario aclarar que la configuración de estos formatos es flexible y puede adaptarse a las necesidades de cada caso específico.

Las velocidades deberán ser tomadas por sentido de circulación de las bicicletas, teniendo en cuenta en la muestra una heterogeneidad de usuarios (trabajadores, estudiantes, deportistas, etc.). Esta actividad debe realizarse en forma continua a lo largo de toda la duración del estudio.

6.3.2.3 Procesamiento y obtención de resultados

La muestra obtenida deberá ser representativa de la velocidad promedio a la cual circulan los usuarios de bicicleta en un día normal o según el objeto del estudio. A cada aforador se le entregan copias suficientes del formato de campo y de los elementos necesarios para la toma de información.

Recogida la información se realiza una depuración manual en el formato de campo confrontando identificaciones y secuencia lógica de los tiempos de recorrido para detectar posibles errores en la toma de información por los aforadores.

Procesamiento de la información

Revisada la información de los formatos y verificado el correcto diligenciamiento de éstos, se procede a digitar usando una hoja electrónica, preferiblemente. Digitada la información, se realiza una segunda depuración contra

Figura 6.13
Velocidad de
bicicletas.
Formato de
campo

[illegible]

Fuente:
elaboración propia

los formatos de campo verificando la veracidad de las bases de datos finales.

Según el objeto del estudio, se entrega la siguiente información para cada punto:

- ◆ Gráfico del corredor y los sectores de este bajo estudio.
- ◆ Velocidad promedio para cada tramo por sentido.
- ◆ Velocidad promedio para cada corredor.
- ◆ Velocidad promedio para todo el sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cal y Mayor y Asociados. *Manual para administración y diseño del tránsito y transporte de Santafé de Bogotá*, 1998.

Arboleda Vélez. *Apuntes de ingeniería de tránsito*. Anexo Manual de instrucciones para las investigaciones de tránsito. Popayán, Universidad del Cauca, 1989.

Box, Paul C. y Oppenlander, Joseph. *Manual de estudios de ingeniería de tránsito*. 4 Ed. México, Representaciones y servicios de Ingeniería S.A.

Davis, S. E., L.E. King y H.D. Robertson. *Predicting Pedestrian Crosswalk Volumes*. Transportation Research Record 1168, TRB, Washington, D.C., 1989.

Federal Highway Administration. MUTCD. *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. New Jersey, US Department of Transportation, US Government Printing Office, 1988.

Institute of transportation engineers. *Manual of Transportation Engineering Studies*. New Jersey, Prentice-Hall, 1994. Capítulos 2, 13 y 14.

Lautso, Kai y Murove, Pentti. *A Study of Pedestrian Traffic in Helsinki. Methods and Results*. Helsinki, Devecon Ljikkennetekniikka Oy, 1974.

McShane, William R. y Roess, Roger P. *Traffic Engineering*. New Jersey, Prentice-Hall, 1990. Capítulo 9.