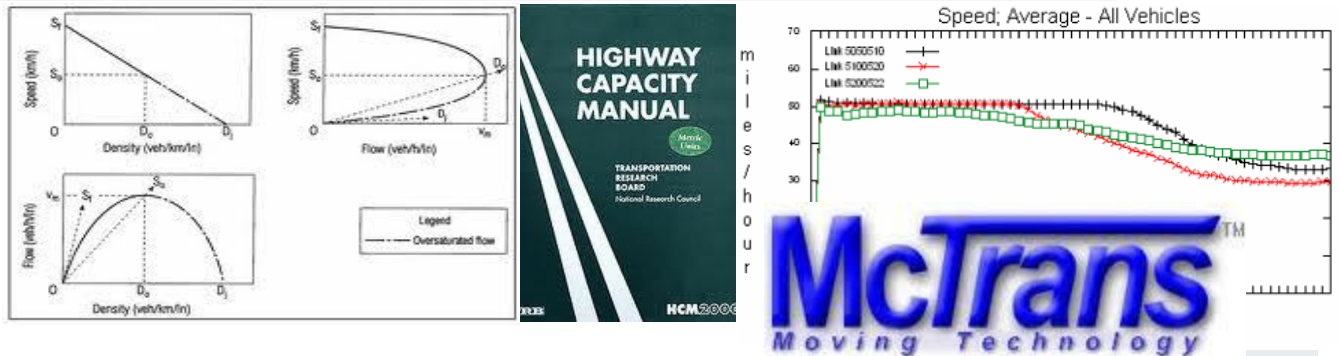


2 Manual de Capacidad de Carreteras



El Manual de Capacidad de Carreteras proporciona a los profesionales e investigadores un consistente sistema de técnicas para la evaluación de la calidad del Servicio que prestan a los usuarios los distintos tipos de caminos y calles. El Manual no establece criterios que tengan en cuenta la calidad del Servicio, adecuada o deseable, para las diferentes categorías de caminos. Esa decisión, la debe tomar el profesional a cargo del proyecto, dado que los objetivos del Manual son proveer una serie de métodos para evaluar los componentes del sistema de transporte, asegurando que los profesionales tengan un acceso a las últimas investigaciones sobre el tema.

La intención del Manual es la de proveer una base sistemática y consistente para el establecimiento de los valores estimados de la Capacidad y de los Niveles de Servicio del sistema de transporte terrestre.

Esos parámetros y procedimientos han sido establecidos a partir de un amplio número de estudios e investigaciones llevados a cabo durante los últimos cincuenta años y ellos reflejan condiciones promedio de circulación en los EE. UU. Por lo tanto, el uso del Manual debe tomarse con cuidado pues la mayoría de los datos de investigación, los valores por defecto y las aplicaciones, son particularmente para los EE. UU.

No obstante que los métodos presentados en el Manual requieren poner un énfasis adicional en la calibración de las ecuaciones de los procedimientos, a las condiciones locales, como así también reconocer las diferencias más importantes en la composición del tránsito, en las características de los conductores y condiciones de la geometría del camino y las medidas de control.



2.1 Versiones 1950, 1965, 1985, 1994 y 2000

Durante los años 1930 y 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 estas. 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 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 entre los más populares está el llamado 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 una computadora 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.

La Figura 2.1-1 es el menú principal del HCS2000

Figura 2.1-1 Menú principal del HCS



Fuente: Highway Capacity Software 2000 (HCS2000).

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.

2.2 Principales características de la versión 2000 del HCM

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 cuanto 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 una autopista carril de y para toda la calzada de una autopista 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 al 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.

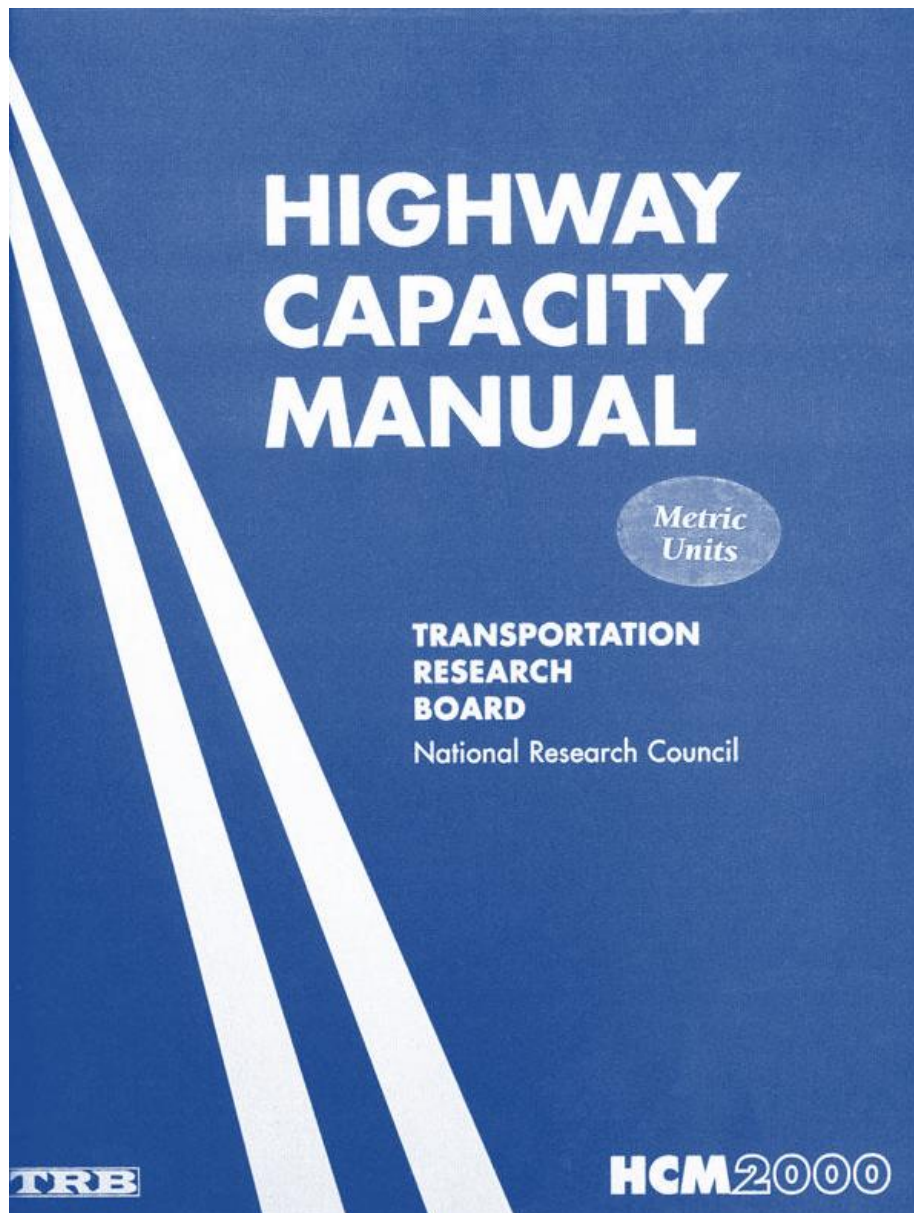
En vías de circulación discontinua no hay una correspondencia tan exacta entre los Niveles de Servicio y los regímenes de circulación, pues los vínculos entre la Capacidad y el Nivel de Servicio no son tan estrechos. Ambos tipos de vía se suelen diseñar para los Niveles de Servicio C o D.

El Nivel de Servicio se define por el valor de uno o más parámetros, que varían de acuerdo al tipo de vía. La Figura 2.2-1 muestra la portada del HCM2000.

Por último, es importante mencionar que está a punto de salir una nueva versión del *Highway Capacity Manual* llamada HCM 2010, en la cual se presentan algunas mejoras como por ejemplo, el capítulo de tránsito fue removida porque el Manual de Capacidad de Tránsito y Calidad de Servicio, 2da edición (TCRP 100) existe. Además, el material de los peatones y ciclistas se trasladarán a los capítulos en los que tienen un impacto en las operaciones con el nuevo capítulo de peatones y de bicicletas se centró en instalaciones exclusivas para los usuarios.



Figura 2.2-1 Portada del Manual de Capacidad 2000 (HCM2000)



Fuente: Highway Capacity Manual 2000 (HCM2000).

El capítulo **Conceptos** proporciona material de introducción y resumen para el Manual en su conjunto. Un elemento nuevo en el volumen será una discusión de la percepción del viajero, que contrasta frente a las medidas operativas de satisfacción para múltiples modos en las calles urbanas. Este material fue desarrollado bajo el proyecto NCHRP 3-70, “Análisis Multimodal de Nivel de Servicio para Calles Urbanas”. Un segundo nuevo elemento en este volumen será una guía general sobre el uso de alternativas para el HCM.

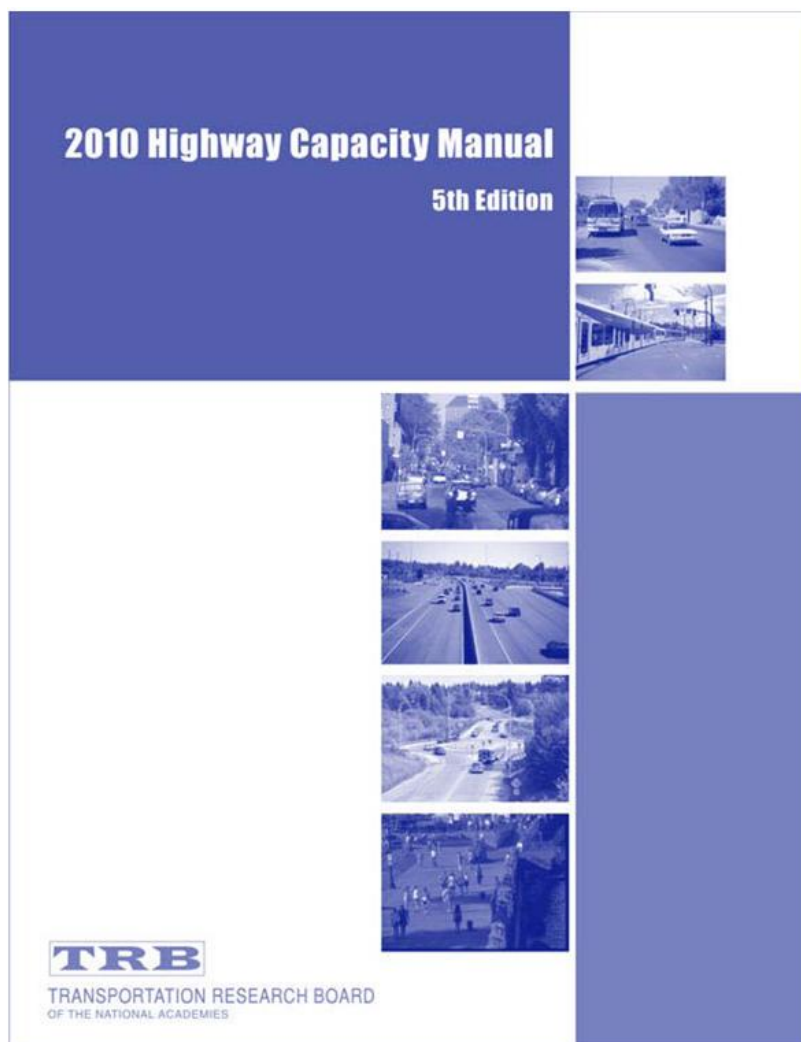


El volumen de flujo continuo direcciona autopistas, autopistas multicarril y autopistas de dos carriles. Los principales cambios son una definición de Nivel de Servicio para autopistas, un nuevo capítulo de trenzado, y la eliminación de la metodología de análisis para autopistas de dos carriles.

El flujo interrumpido direcciona intersecciones (señalizaciones, controles de alto, glorietas), calles urbanas e intercambios de terminales de rampa. La investigación de la percepción de viajeros se incorporará en el capítulo de instalaciones en calles urbanas, junto con el material desarrollado en NCHRP 3-79, “la Medición y Predicción de la Presentación de tráfico de Automóviles en Calles Urbanas”. En el capítulo de intersecciones semaforizadas, la actual ecuación basada en determinación de retardo uniforme y colas será reemplazado por un enfoque basado en el análisis de incremento de colas. Además, el capítulo de intercambios de terminales de rampas será reemplazado con el trabajo desarrollado por NCHRP 3-60, “Capacidad y Calidad del Nivel de Servicio de Intercambios de Terminales de Rampa.”

La Figura 2.2-2 muestra una portada preliminar del HCM2010.

Figura 2.2-2 Highway Capacity Manual Versión 2010



Fuente: Highway Capacity Manual 2010 (HCM2010).



2.3 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. La aplicación más útil del análisis de circulación es, sin embargo, cuando se requiere 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 autopista 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.
- ⇒ 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 solo 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 periodos 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 solo 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 de hora pico, FHP, conociendo las características de la vía que se estudia. Entonces, dividiendo el volumen para toda la hora ente el factor de hora pico se estima el volumen (en veh/h) para el cuarto de hora de mayor demanda. Sin embargo, si se conoce la demanda en periodos de al menos 15 minutos, es más preciso utilizar el mayor de ellos para hacer el análisis y olvidarse del factor de hora pico.



2.4 Estructura del HCM 2000

El *Manual de Capacidad de Carreteras 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 microanálisis o análisis más complejos.

2.5 Uso del HCM en México

Como ya se mencionó anteriormente en la planeación, proyecto y operación de las obras viales, los análisis de Capacidad juegan un papel preponderante, pues permiten estimar las máximas magnitudes de tránsito operables, mientras se mantengan los atributos que caracterizan la calidad del flujo vehicular.

En México se tiene una versión en español del HCM; en esta versión los procedimientos descritos en este Manual están basados en la cuarta edición del Manual de Capacidad de Carreteras de Estados Unidos, con lo que se justifica al ser las diferencias entre conductores, vehículos y carreteras de México y Estados Unidos poco significativas y perder importancia frente a la fuerte variabilidad en las distribuciones de las demandas de tránsito y a la gran incertidumbre de su evolución futura. De cualquier forma, cuando los procedimientos lo permiten, se incorpora información de estudios desarrollados en México para, en lo posible, ajustar este Manual a las condiciones del país.

La Figura 2.5-1 es una imagen del Manual utilizado en México desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) de la SCT.

Cabe destacar que dicho Manual es obsoleto pues está basado en la versión de 1985 del Manual de Capacidad de Carreteras y como se ha mencionado está por salir la versión 2010 (HCM2010).

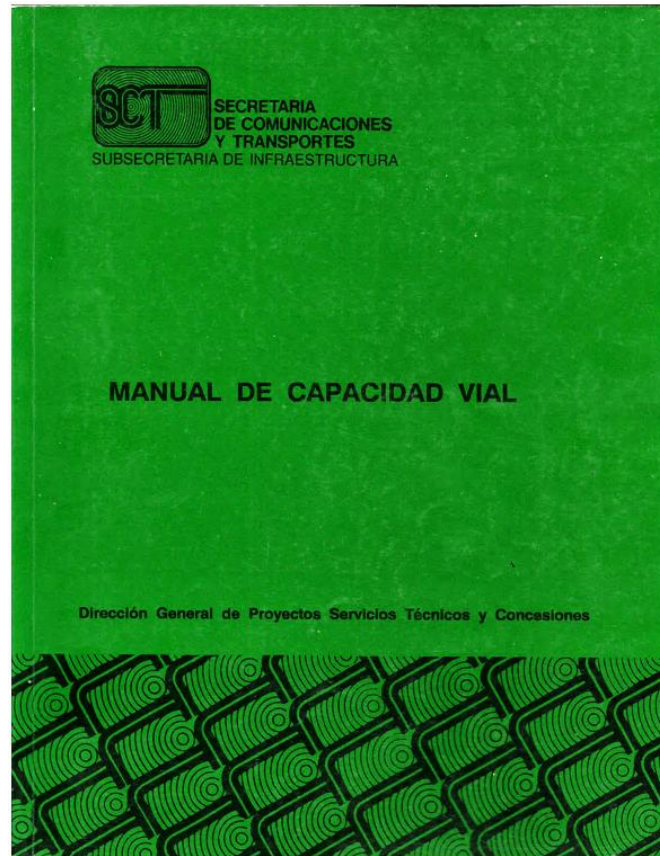
Como una muestra de los ajustes mencionados está lo propuesto por el documento del Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes: ***Efecto de la Regularidad Superficial en la Capacidad Vial de Autopistas y Carreteras multicarril mexicanas***,¹ el

¹ Efecto de la Regularidad Superficial Superficial en la Capacidad Vial de Autopistas y Carreteras multicarril mexicanas. Instituto Mexicano del Transporte.



cual muestra la adaptación del HCM2000 a las condiciones de las carreteras de México como se muestra a continuación:

Figura 2.5-1 Manual de Capacidad Vial



Fuente: Manual de Capacidad Vial, Instituto Mexicano del Transporte.

Los procedimientos de estimación de Capacidad Vial y Nivel de Servicio asumen la presencia de buenas condiciones de superficie de rodadura, al cual se evalúa mediante herramientas que miden el perfil longitudinal del camino. El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es la medida estándar de la regularidad superficial de un camino.

El efecto de la regularidad superficial se incorpora mediante una adaptación de la metodología estadounidense para Autopistas y Carreteras multicarril en el Manual de Capacidad Vial de los Estados Unidos (HCM2000), donde el Nivel de Servicio se evalúa a partir del volumen horario por carril, ajustado por diversos factores, así como de la Velocidad a Flujo Libre, estimada a partir de un valor ideal, reducido según las condiciones de la Carretera.

La adaptación introducida consiste en sustituir el factor de reducción de la velocidad por ancho de carril, por otro que incluye conjuntamente el ancho de carril y la regularidad superficial. Este nuevo factor se generó a partir de una serie de mediciones de velocidad de punto en tramos



experimentales mexicanos con distintas combinaciones de valores de ancho de carril e Índice Internacional de Rugosidad. En la Tabla 2.5-1 se presentan los nuevos factores así obtenidos:

Tabla 2.5-1 Valores para el factor por ancho de carril y estado del pavimento

Reducción de velocidad por IRI, y ancho de carril [km/h]			
IRI	Ancho de carril [m]		
	3.30	3.50	3.65
2.5	10.25	5.71	0.00
3	13.35	8.67	2.70
4	20.18	14.71	8.13
5	26.94	20.91	13.82
6	33.83	27.28	19.77
7	40.83	33.80	25.98
8	47.95	40.48	32.45
9	55.19	47.33	39.18
10	62.55	54.33	46.17
11	70.03	61.50	53.42
12	77.63	68.83	60.93

Fuente: Efecto de la Regularidad Superficial en la Capacidad Vial de Autopistas y Carreteras multicarril mexicanas. Instituto mexicano del Transporte.

A continuación se muestra la modificación a la ecuación para la determinación de la Velocidad a Flujo Libre (que se verá en el capítulo 4.1) en donde se reemplaza el factor por ancho de carril (f_{LW}) por el factor por ancho de carril y estado del pavimento (f_{PLW}):

$$FFS = BFFS - f_{PLW} - f_{LC} - f_N - f_{ID}$$

Dónde

- FFS= Velocidad a flujo libre (km/h),
- BFFS= Velocidad a flujo libre base, 110 km/h (urbano) o 120 km/h (rural),
- f_{PLW} = Factor de ajuste por ancho de carril y estado del pavimento,
- f_{LC} = Factor de ajuste por distancia lateral libre (tabla),
- f_N = Factor de ajuste por número de carriles (tabla),
- f_{ID} = Factor de ajuste por número de intercambiadores (tabla).

La modificación presentada a la ecuación anterior puede adaptarse a las hojas de trabajo desarrolladas en esta tesis en MathCad para realizar los análisis que se desarrollan en los siguientes capítulos como parte del objetivo de este trabajo.



2.6 Procedimientos computarizados

Para cada elemento del sistema vial, la metodología del HCM ofrece un procedimiento Manual que se puede ejecutar en hojas de trabajo y realizando cálculos matemáticos, relativamente sencillos, pero laboriosos, que consumen tiempo importante.

Para facilitar, la metodología manual, se han desarrollado programas informáticos, que ejecutan, con bastante precisión, los procedimientos del HCM en la computadora, de manera muy rápida. La herramienta informática utilizada actualmente es el HCS (Highway Capacity Software: Programa de Capacidad Vial) en su versión 5.2 del año 2005.

La organización del programa HCS es muy similar a la del Manual HCM, que maneja tres módulos básicos: corrientes vehiculares de flujo continuo, corrientes vehiculares de flujo discontinuo y transporte público o masivo, los cuales son presentados en el menú principal. Cada uno de estos módulos usa extensiones de archivo propias, de tal manera que los datos pueden residir en un simple directorio de datos, pero cada módulo específico de análisis solamente despliega sus propios datos.

La Figura 2.1-1 muestra la interfaz principal para Segmentos Básicos de Autopistas del Programa de Capacidad Vial HCS2000.

Figura 2.6-1 Interfaz principal del HCS2000 para Segmentos Básicos de Carreteras

HCS2000 Freeways - [ejemplo1]

File Edit View Window Help

BASIC FREEWAY SEGMENTS OPERATIONAL ANALYSIS

Analyst: [jose] Freeway/Direction: [cuernavaca]
Agency or Company: [personal] From/To: [1+000 5+000]
Date: [29/04/2010] Units: U. S. Metric Jurisdiction: []
Analysis Time Period: [] Analysis Year: []
Project Description: []

FLOW RATE

Volume, V: [2000] vph
Peak-hour factor, PHF: [0.90]
Peak 15-minute volume: [556] v
Number of lanes, N: [2]
Terrain: [Rolling]
Grade: [0.00] %
Length: [0.00] km
Trucks and buses: [5] %
E_T: [2.5]
RVs: [0] %
E_R: [2.0]
Heavy vehicle adjustment, f_{HV}: [0.930]
Driver population adj., f_P: [0.92]
Flow rate, vp: [1298] pcphpl

PLANNING DATA

Average annual daily traffic, AADT: [] vpd
Peak-hour proportion of AADT, K: []
Peak-hour direction proportion, D: [] %

FREE-FLOW SPEED

Free-Flow Speed and Type
 Measured, FFS Base FFS, BFFS
[120.0] km/h

Speed Adjustments

Lane width, LW: [3.3] m
f_{LW}: [3.1] km/h
Right-shoulder lateral clearance, LC: [1.8] m
f_{LC}: [0.0] km/h
Interchange density, ID: [0.30] interchange/km
f_{ID}: [0.0] km/h
Number of lanes, N: [2]
 Rural freeways, (f_n = 0.0) f_{k1}: [0.0] km/h

Name of the Analyst: [jose]
For Help, press F1

Fuente: Elaboración propia.

