

Novedades en la edición del año 2000 del Manual de Capacidad



POR D. MANUEL ROMANA GARCÍA
PROF. TITULAR DE UNIVERSIDAD,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
CIVIL-TRANSPORTES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
MADRID

1. Introducción

Desde el pasado mes de octubre es posible encargar el nuevo Manual de Capacidad de Carreteras (MCC) del *Transportation Research Board* norteamericano. En esta nueva edición, que se comenzó a enviar en noviembre, se sobrepasa el concepto anterior de Manual de Capacidad de Carreteras, ya que se combinan los análisis de una infraestructura com-

pleta con los de un corredor, para hacer frente a los problemas suscitados por unos conjuntos de infraestructuras sensiblemente paralelos que compiten entre sí, o, mejor, representan una graduación de la oferta de transporte.

El Manual, sobradamente conocido y de aplicación prácticamente universal en Ingeniería de Tráfico, se apoya en su pasado, que cabe calificar de glorioso: un conjunto de técnicas y criterios de análisis que abarcan todas las infraestructuras viarias, y que tienen en cuenta las peculiaridades de las vías empleadas por peatones, vehículos y ciclistas, tanto con circulación interrumpida

(con semáforos) como continua. Ha sido, sin duda, el documento de referencia para estudiar la capacidad y el nivel de servicio durante tres décadas.

Desde la edición de 1995 se planteó dentro del Comité la necesidad de renovar de forma más completa el Manual. Mediante la asignación de unos fondos de investigación generosos se fueron cambiando los procedimientos establecidos, que databan en algunos casos de varias décadas, y se apoyaban en investigaciones a veces locales o no demasiado extensas. Asimismo, era necesario responder a las voces que pedían la posibilidad de realizar unos análisis más complejos,

basados en la simulación, particularmente para infraestructuras complejas, como la interacción de una autopista, a través de un enlace, con una vía arterial con semáforos. Por último, en los últimos años se ha asentado la idea (correcta) de que la fluidez de la circulación en las horas punta es un estado de falta de equilibrio que atrae a más demanda. Esta idea de "gestionar la congestión" se impone, haciendo necesario el análisis de corredores completos o de grandes áreas metropolitanas.

2. La estructura del nuevo manual

El Comité de Capacidad y Nivel de Servicio, el más activo y, seguramente, el más importante de los que componen el TRB, planteó esta edición como una renovación completa, que se traduce especialmente en tres hechos:

1. La nueva edición se distribuirá en CD-ROM, lo que facilitará que su precio no sea elevado, y cuenta con algunos programas de apoyo que realizan cálculos. Así

se mitiga el problema de su creciente tamaño, aun a pesar de la vigilancia impuesta al respecto por el Comité. La nueva versión del Manual tiene un número de páginas considerablemente superior a la edición de 1998.

2. El índice del documento ha cambiado mucho, terminando con una situación en la que los ingenieros de tráfico se referían al número del capítulo más que al tipo de infraestructura.
3. En el nuevo manual se separan claramente los capítulos dedicados a conceptos y definiciones de los dedicados al análisis de cada infraestructura.

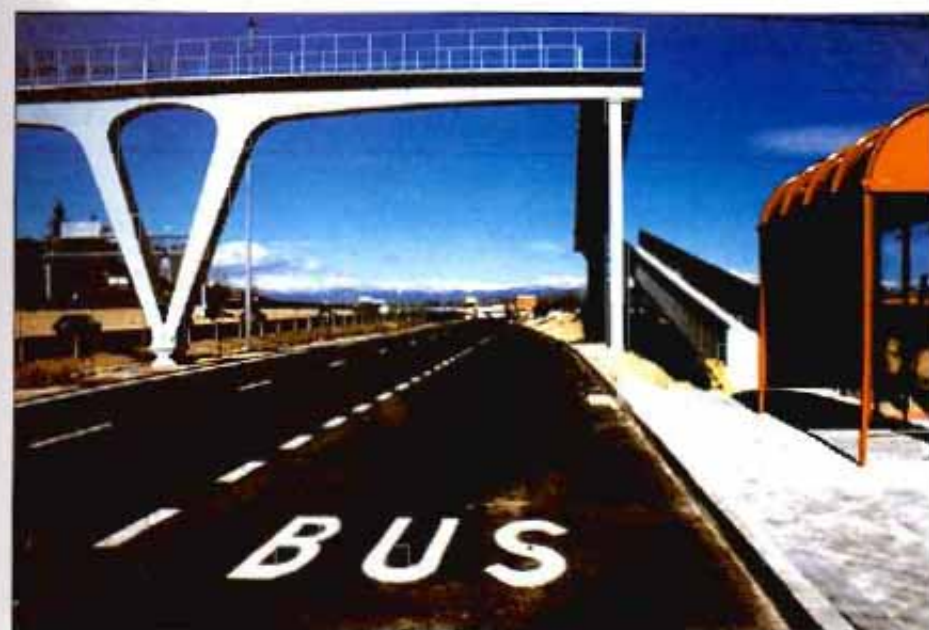
El nuevo manual está dividido en seis partes. En la primera se da una panorámica de los conceptos relacionados con la circulación vial, una discusión de las aplicaciones de las técnicas incluidas en el manual y la descripción de las decisiones que se pueden tomar basándose en estos estudios. La segunda parte contiene las definiciones precisas de los conceptos aplicables a cada tipo de infraestructura, así como los valores

normales que pueden adoptarse para las distintas variables que se usan en la tercera parte. Esta tercera parte describe con detalle las técnicas que se deben emplear en carreteras, autopistas, transporte colectivo, vías para bicicletas y aceras para peatones, con el fin de conocer su capacidad y evaluar su nivel de servicio presente o futuro.

La parte cuarta se ocupa del problema de analizar más de una infraestructura: contiene técnicas de análisis de corredores, áreas metropolitanas y explotación de infraestructuras multimodales, dando en ocasiones técnicas concretas y en otras centrando el análisis de forma general. La quinta parte introduce al lector en la simulación de la circulación vial, describiendo algunos de los modelos existentes y citando sus posibles aplicaciones. Finalmente, la sexta parte es una serie de ejemplos de aplicación de las técnicas descritas en la tercera parte.

Sin duda, uno de los hechos más importantes para los europeos es que esta edición del Manual está en unidades pertenecientes al sistema internacional (métrico), con lo que se evita la conversión de unidades necesaria hasta ahora.

El cambio que ha tenido lugar no es una revolución súbita, pero presenta algunas ventajas para los usuarios de fuera de los Estados Unidos. La participación internacional, y en particular la europea, ha sido más importante. El documento, en cualquier caso, no cambia radicalmente el modo de enfocar los problemas de tráfico. El Comité ha considerado que disponía de un considerable cuerpo de doctrina, y de un documento válido, aunque mejorable. Así, se ha cuidado la compatibilidad de los análisis nuevos y los anteriores en la medida de lo posible.



El documento, en cualquier caso, no cambia radicalmente el modo de enfocar los problemas de tráfico.

3. A quién se dirige el manual y cómo se emplea

El Manual está dirigido a un conjunto heterogéneo de usuarios, cuyo rasgo común es el interés en el análisis de las condiciones de la circulación. Este grupo abarca a las personas encargadas directamente de la explotación de las infraestructuras viarias, tanto en la carretera como en oficina, ingenieros proyectistas, planificadores, gestores de infraestructuras y universitarios, tanto docentes como alumnos.

Aunque el manual es explícito, y no requiere conocimientos teóricos considerables, es conveniente que las personas que lo empleen dispongan de unos conocimientos teóricos mínimos en lo que respecta a la teoría de la ingeniería de tráfico. Estos conocimientos pueden ser impartidos en cursos cortos, sin necesidad de recargar los aspectos teóricos y de investigación, aunque es preferible que en este caso se combinen con una experiencia práctica apreciable.

Para conseguir este propósito, los autores del manual recogen su contenido de dos fuentes principales:

- Por un lado, los resultados disponibles de investigaciones realizadas en todo el mundo, especialmente las referentes a aspectos prácticos y contrastados.
- Por otro, las experiencias acumuladas por los usuarios en la aplicación de los procedimientos de versiones anteriores del manual, así como las ventajas o dificultades de medir características de la circulación en casos reales.

Si bien la aspiración del Manual es la universalidad (puede ser aplicado en todo el mundo

y en toda clase de infraestructuras), las investigaciones que son su base son en su mayoría norteamericanas, aunque el peso de los profesionales de otros continentes está aumentando. Pueden incluso identificarse algunas áreas metropolitanas como los escenarios donde se toman los datos de base para las investigaciones. Por ello, la aplicación de los procedimientos expuestos debe ser racional, siendo preciso elegir entre realizar un juicio sobre el resultado obtenido, estimar ciertos coeficientes de otra forma distinta o, en situaciones muy diferentes, decidir que los métodos expuestos no deben ser aplicados.

En todo caso, el manual incluye métodos completos, sencillos de seguir y ordenados, incluyendo ejemplos de aplicación. Por ello, es una fuente de conocimientos sencilla y universal en materia de tráfico.

4. Tipos de estudios: evaluación y proyecto

Es posible realizar dos tipos de estudios distintos: de evaluación de infraestructuras existentes, y de proyecto de nuevas autopistas.

Los estudios de **evaluación** tienen por objeto conocer la calidad del servicio ofrecido por una infraestructura existente a los usuarios. Deseablemente, debe partirse de la medida de la velocidad libre y del factor de hora punta. Asimismo, se toma una intensidad de cálculo que suele ser la hora 30. En estas condiciones, se determina el nivel de servicio, siendo aceptables situaciones con niveles de servicio **D** o mejores.

El resultado de los estudios de **proyecto** es el dimensionamiento de la infraestructura, determinando el número de carriles de cada tramo homogéneo en función de la geometría y la demanda. Suele determinarse un número de carriles suficiente como para que el nivel de servicio en el año horizonte sea el **C** u otro mejor.

5. Nivel de servicio

5.1. Definición

A la hora de decidir si una infraestructura es adecuada, es fundamental tener en cuenta cómo cumple su función. Para ello se emplea el **nivel de servicio**, que puede definirse como el modo en que los con-

Tabla 1.
Variables que determinan el nivel de servicio en cada tipo de infraestructura

Tramos básicos de autopista	Densidad (veh./km/carril)
Tramos de trenzado en autopistas	Velocidad media (km/h)
Ramales de enlace en autopistas	Intensidad (veh./h/carril)
Carreteras multicarril	Densidad (veh./km/carril)
Carreteras de dos carriles	Porcentaje de tiempo de demora (%) Velocidad media (km/h)
Intersecciones reguladas con semáforos	Demora media (s/veh.)
Vías arteriales	Velocidad media (km/h)
Transporte público	Factor de carga
Peatones	Espacio disponible (m ² /persona)

ductores y viajeros (usuarios) perciben las condiciones de funcionamiento de una circulación de vehículos.

El nivel de servicio es una medida cualitativa del funcionamiento de una vía. Con el objeto de uniformizar los estudios, es usual definir seis niveles de servicio, entre A (un servicio óptimo) y F (un servicio pésimo). La caracterización de cada nivel de servicio es generalista, con apreciaciones globales, y distintas para cada tipo de infraestructura. A continuación, se describen los niveles de servicio para autopistas, con el objeto de centrar lo que quiere decir cada uno de ellos.

5.2. Evaluación de los niveles de servicio

En teoría, se podría definir un nivel de servicio mediante una larga serie de valores de las variables. Por ejemplo, el nivel de servicio en un tramo de autopista sería A si la densidad es menor de 6 veh./km/carril, la velocidad del orden de 120 km/h, y la luz existente no produce deslumbramientos. Sin embargo, muchas de estas circunstancias se dan simultáneamente, y la adopción de todas ellas complica la medición, ya que sería necesario medir todas las variables mencionadas. Además, sería complejo determinar el nivel de servicio si algunas variables estuvieran dentro de los rangos mencionados y otras fuera.

Por todo ello, el Comité de Capacidad, que elabora el MCC, se ha propuesto medir el nivel de servicio en cada infraestructura mediante una sola variable. En 1997, sin embargo, se aprobó permitir que se elaboraran metodologías basadas en dos variables, particularmente para carreteras de dos carriles y sistemas de transporte público. En el Manual del año 2000 se incluyen



Las demoras o incidentes son internos a la circulación, y no externos, como ocurre en los nudos, o en presencia de conexiones.

unas metodologías basadas en dos variables. Las variables elegidas se recogen en la tabla 1.

6. Autopistas

En el análisis de segmentos básicos de autopista se considera el funcionamiento de una calzada, ya que la circulación en cada una de las dos es, en principio, independiente de la circulación en el sentido opuesto. El estudio debe centrarse, entonces, en la calzada más cargada en el periodo punta.

La circulación en un tramo básico de autopista no depende del exterior, sino de las características físicas de la calzada y de la corriente de la circulación. Las demoras o incidentes son internos a la circulación, y no externos, como ocurre en los nudos, o en presencia de conexiones.

6.1. Condiciones ideales de circulación

Se consideran **condiciones ideales de circulación** las que permiten la circulación libre de los vehículos aislados a la velocidad deseada. Estas

condiciones son de dos tipos: las que dependen del trazado y las que dependen de la corriente de vehículos que circula por el tramo.

Según el MCC 2000, son condiciones ideales de la infraestructura:

- Que cuente con carriles suficientemente anchos (superiores a 3,6 m).
- Que no existan obstáculos laterales que hagan disminuir la velocidad de los vehículos, para lo cual todo obstáculo existente en el margen derecho debe estar a una distancia superior a 1,8 m, y todo obstáculo en la mediana a más de 0,6 m.
- Que disponga de un número adecuado de carriles por calzada. El MCC 2000 estipula un mínimo de dos carriles por calzada en autopistas en zonas rurales y cinco en autopistas en zonas urbanas. Esto último entra en contradicción con la instrucción de trazado vigente de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, ya que en ella se prohíbe, salvo justificación especial, la construcción de calzadas de más

de cuatro carriles. No parece que sea razonable considerar que la velocidad libre de los vehículos en Europa, y en particular en España, se reduce si el número de carriles disponible es inferior a cinco. En general, consideramos que si se dispone de tres carriles o más por calzada, no deben aplicarse reducciones por este concepto.

- Que los enlaces estén situados a distancias superiores a los 3 km.
- Que la pendiente longitudinal sea inferior al 2 %.

Son condiciones ideales de la circulación:

- Que se componga únicamente de vehículos ligeros, definidos con un cierto rango de valores de la relación peso/potencia, medida en kg/W o en kg/CV.
- Que todos los conductores sean habituales, esto es, que conozcan las características de la infraestructura, tanto de la traza como la situación y disposición de los enlaces.

Si se dan todas las condiciones mencionadas, la velocidad de los vehículos con intensidades pequeñas será libre, y dictada únicamente por las características geométricas del trazado en planta, tales como radios y transiciones, y la velocidad máxima legalmente permitida.

6.2. Velocidad libre. Relación intensidad – velocidad

La velocidad libre es aquella a la que circulan los vehículos cuando la intensidad es muy baja, y la densidad es prácticamente cero. En condiciones ideales, diversos estudios realizados han permitido la elaboración de curvas tipo que relacionan la intensidad y la velocidad espacial de circulación. Estas curvas dependen de la velocidad libre, dictada

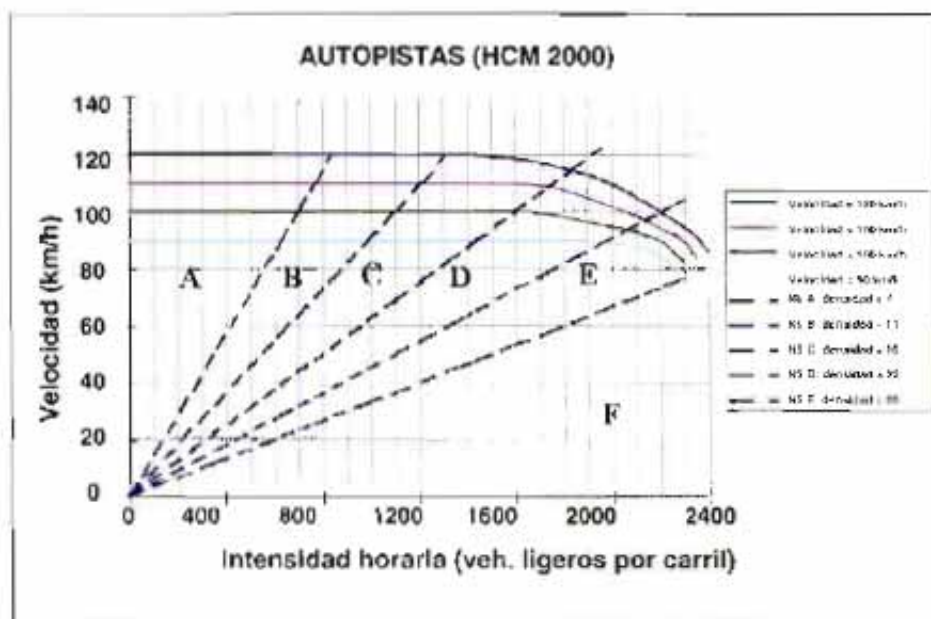


Figura 1. Curvas intensidad-velocidad en autopistas (MCC 2000).

únicamente por su trazado (ver figura 1).

Como puede apreciarse, en los estudios realizados se comprueba que las velocidades continúan siendo iguales a la velocidad libre para intensidades inferiores a 1 300 veh./h/carril en el peor de los casos (velocidad libre igual a 120 km/h). Si la velocidad libre es de 100 km/h, ésta se mantiene hasta que se alcanza una intensidad de 1 700 veh./h/carril.

Esta resistencia de los conductores a reducir su velocidad por la presencia de otros vehículos ha sido el factor que llevó a la consideración de la densidad como variable básica. En las ediciones anteriores a 1985, la variable que dictaba el nivel de servicio era la velocidad. Las densidades máximas para cada nivel de servicio son las siguientes: 7 (nivel A), 11 (nivel B), 15 (C), 22 (D) y 28 (E).

La capacidad de la vía depende de la velocidad libre, variando entre 2 300 y 2 400 veh./h/carril. Debe recordarse que este valor se alcanza en un periodo de 15 minutos para una circulación exclusiva de vehículos ligeros y conductores habituales.

6.3. Determinación del nivel de servicio

La determinación del nivel de servicio sigue un esquema como el indicado en la figura 2. El punto de partida es la velocidad libre, que puede medirse, o estimarse a partir del trazado real. En caso de medirse, deben realizarse medidas en todos los carriles, con un número total de vehículos no inferior a 100, y cuando las intensidades no superen los 1 200 vehículos por hora y carril.

Si se opta por la determinación de la velocidad, debe partirse de la velocidad correspondiente al percentil 85 con tráfico fluido. Esta velocidad, en general, puede considerarse igual a 120 km/h. A continuación, se consideran las condiciones reales, y se comparan con las ideales. Si las condiciones reales son más restrictivas, se aplican reducciones de la velocidad libre según unas tablas que se incluyen a continuación (tablas 2, 3, 4, y 5).

6.4. Determinación de la velocidad libre

La velocidad libre es, como se ha mencionado, la desarrollada por los vehículos cuando

la intensidad es menor de 1 300 veh./h/carril. Puede determinarse mediante mediciones realizadas en la propia autopista, o bien estimarse a partir de las condiciones geométricas existentes en el tramo.

La medición de la velocidad debe realizarse en una sección representativa, con intensidades bajas, y cumplir ciertas características:

- 1) Que se mida la velocidad de todos los vehículos, o de una muestra consistente (por ejemplo, cada décimo vehículo).
- 2) Que se realicen medidas en todos los carriles.
- 3) Que la muestra final sea superior a los 100 vehículos.
- 4) Que la medición sea suficientemente precisa y fiable.

En caso de optar por la estimación, los factores que influyen en una reducción de la velocidad libre son:

- La anchura del carril.
- La presencia de obstáculos a la derecha.
- El número de carriles.
- La frecuencia de accesos a la propia autopista.

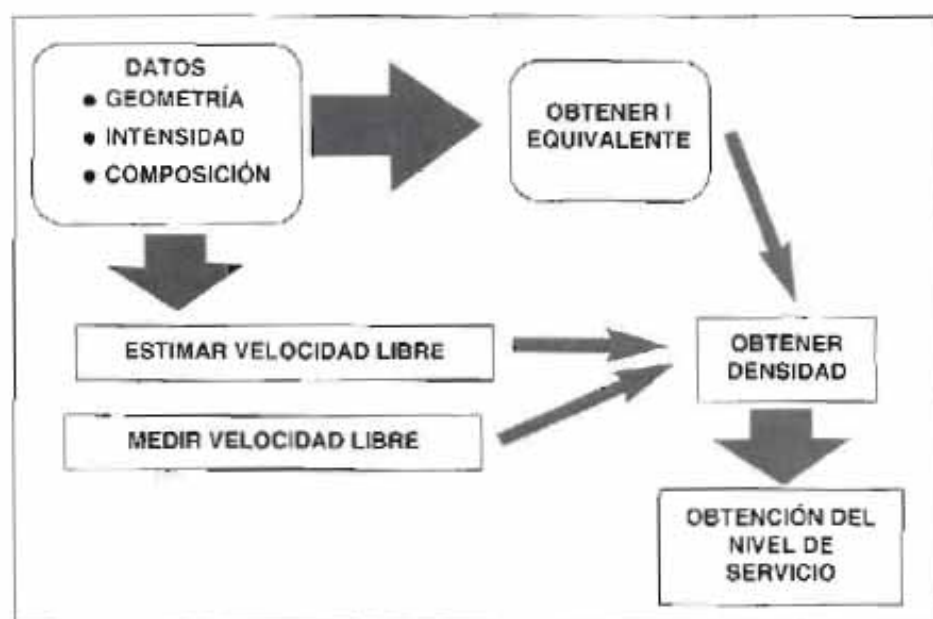


Figura 2. Esquema de la obtención del nivel de servicio en tramos básicos de autopista.

Tabla 2.
Reducción de velocidad libre por anchura de carril (autopista)

Anchura de carril (m)	Reducción de la velocidad libre (km/h)
3,60	0,0
3,50	1,0
3,40	2,1
3,30	3,1
3,20	5,6
3,10	8,1
3,00	10,6

Efecto de la anchura del carril

De acuerdo con el MCC, si el carril tiene una anchura inferior a 3,60 m, los vehículos circulan con mayor precaución y velocidades menores. La reducción se refleja en la tabla 2.

Efecto de los obstáculos a la derecha

Cuando existen obstáculos a la derecha a menos de 1,8 m (condiciones ideales), la velocidad libre se reduce por la influencia de éstos. El valor de la reducción se incluye en la tabla 3.

En cambio, el Manual no prevé ninguna reducción reglada por la existencia de obstáculos a la izquierda a menos de 0,6 m. Esto se debe a que es muy raro que tales obstáculos existan. El propio Manual afirma que debe ejercerse un juicio meditado acerca de si objetos como barreras o muros, que son continuos, son verdaderamente obstáculos. Sólo pueden considerarse como tales si los conductores lo consideran así, y no cuando éstos están acostumbrados a su presencia. De estar en este úl-

Tabla 3.
Reducción de velocidad libre por presencia de obstáculos a la derecha (autopista) en km/h

Distancia al al obstáculo (m)	Carriles por calzada		
	2	3	4
≥ 1,80	0,0	0,0	0,0
1,5	1,0	0,7	0,3
1,2	1,9	1,3	0,7
0,9	2,9	1,9	1,0
0,6	3,9	2,6	1,3
0,3	4,8	3,2	1,6
0,0	5,8	3,9	1,9



Autopista Interurbana A-19 (E 6) con tres carriles por sentido.

timo caso, el efecto del objeto sobre la circulación será prácticamente nulo. La altura del obstáculo es una variable importante para este juicio, como también la existencia simultánea de objetos y de carriles con escasa anchura.

Efecto del número de carriles por calzada

El MCC estima que existen dos casos muy distintos: autopistas interurbanas y autopistas urbanas y suburbanas. Los autores del MCC afirman que la velocidad libre se reduce si el número de carriles por calzada es menor que uno dado. Este número es dos para autopistas interurbanas, y cinco para autopistas urbanas. La *tabla 4* contiene las reducciones aplicables por este concepto. Es dudoso que en Europa Occidental, y en particular en España, se reduzca en un grado tal la velocidad libre; por lo que se aconseja una decisión explícita y justificada de la aceptación o rechazo de esta reducción en cada estudio.

Efecto de la frecuencia de conexiones

Si la distancia media entre conexiones con la autopista

(entradas) es inferior a 3,3 km (o, lo que es lo mismo, que existan más de 3 cada 10 km), la velocidad libre se ve también afectada. La *tabla 5* recoge los valores aplicables. La medida debe realizarse en una sección de un mínimo de 10 km de

longitud (5 km aguas arriba y 5 km aguas abajo de la sección considerada).

Determinación de la velocidad libre

La velocidad libre vendrá dada por la velocidad libre ideal menos las reducciones que sean aplicables, según la fórmula siguiente:

$$V_{\text{libre}} = V_{\text{libre ideal}} - V_{\text{anchura de carril}} - V_{\text{apropiación de carril}} - V_{\text{anchura de carril}} - V_{\text{anchura de carril}} - V_{\text{anchura de carril}}$$

6.5. Intensidad equivalente

Las intensidades de circulación en dos autopistas no son variables homogéneas, ya que existen dos factores que deben ser tenidos en cuenta: la composición de la circulación y la familiaridad de los conductores con la infraestructura. Es necesario, como ya se ha mencionado, convertir la intensidad real en una intensidad equivalente de vehículos ligeros y conductores habituales.

Tabla 4. Reducción de velocidad libre por número de carriles por calzada (autopista)¹

Número de carriles por sentido	Reducción de la velocidad libre (km/h)
≥ 5	0,0
4	2,4
3	4,8
2	7,3

¹) Aplicable sólo a autopistas urbanas y suburbanas.

Tabla 5. Reducción de velocidad libre por frecuencia de conexiones (autopista)¹

Conexiones por kilómetro	Reducción de la velocidad libre (km/h)
< 0,3	0,0
0,4	1,1
0,5	2,1
0,6	3,8
0,7	5,0
0,8	6,0
0,9	8,1
1,0	9,2
1,1	10,2
1,2	12,1

¹) Aplicable sólo a autopistas urbanas y suburbanas.

Además, es preciso recoger la diferencia entre la intensidad horaria de proyecto y la de los quince minutos más cargados.

Para ello se emplea la fórmula siguiente:

$$I_{eq} = \frac{I_{real}}{N \cdot FHP \cdot f_{vp} \cdot f_c}$$

donde:

I_{eq} es la intensidad equivalente en el período punta;

I_{real} es la intensidad en vehículos reales;

N es el número de carriles por calzada;

FHP es el factor de hora punta;

f_{vp} es el factor de composición de la circulación;

f_c es el factor de experiencia de los conductores.

Factor de hora punta (FHP)

El factor de hora punta es la relación entre la intensidad de una hora y cuatro veces la intensidad del cuarto de hora más cargado. Este factor es menor que uno, dada la definición, y suele variar entre 0,80 y 0,95. Es aconsejable que se mida el valor real en la región en la que se encuentra el tramo estudiado, ya que puede variar de forma muy apreciable con las costumbres locales y las características del período punta.

Equivalencia de vehículos pesados

Para determinar la equivalencia de los vehículos pesados es necesario acudir a estudios de infraestructuras reales, ya



En general, en las autopistas urbanas la gran mayoría de los conductores hacen el mismo trayecto todos los días, lo que favorece la mayor fluidez de la circulación.

que la equivalencia se define como el número de vehículos ligeros que causan el mismo efecto en la circulación que uno de ese tipo. Por tanto, los equivalentes son específicos para cada tipo de vehículo y cada tipo de terreno. La tabla 6 recoge los equivalentes para tramos normales. El MCC contiene los valores correspondientes a rampas especiales.

El factor de equivalencia de vehículos pesados se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{vp} = \frac{100}{(100 - PC - PR) + EC \cdot PC + ER \cdot PR}$$

donde

f_{vp} es el factor de equivalencia;

PC es el porcentaje global de camiones y autobuses;

PR es el porcentaje de vehículos de recreo;

EC es el equivalente de camiones y autobuses;

ER es el equivalente de vehículos de recreo.

Factor de experiencia de los conductores

Cuando los conductores conocen la infraestructura circulan con mayor seguridad, lo que se traduce en una mayor capacidad. En general, en las autopistas urbanas la gran mayoría de los conductores hacen el mismo trayecto todos los días, lo que favorece la mayor fluidez de la circulación.

Es un hecho conocido que los conductores cuyo viaje está originado por razones de ocio (turismo y actividades similares) aprovechan menos la infraestructura, debido a sus velocidades menores. Este comportamiento está causado porque se combinan el deseo de contemplar el paisaje y los titubeos ocasionados por la ignorancia. Por tanto, debe aplicarse un factor de conductores de entre 0,85 y 1,00. En todo caso, en general se considera que, excepto en rutas de marcado carácter turístico, en la hora punta los conductores son en su mayoría habituales, por lo que este coeficiente suele ser igual a la unidad. De hecho, este autor considera que, si se emplea un valor distinto, éste debe ser

Tabla 6. Equivalencia de vehículos en autopistas y carreteras multicarril

Tipo de vehículo	Tipo de terreno		
	Llano	Ondulado	Accidentado
Camión y autobús (EC)	1,5	3,0	6,0
Vehículos de recreo (ER)	1,2	2,0	4,0

Tabla 7. Reducción de velocidad libre por despeje lateral (carreteras multicarril)

Carreteras de dos carriles por sentido		Carreteras de tres carriles por sentido	
Despeje lateral total (m)	Reducción de la velocidad libre (km/h)	Despeje lateral total (m)	Reducción de la velocidad libre (km/h)
3,60	0,00	3,60	0,00
3,00	0,64	3,00	0,64
2,40	1,45	2,40	1,45
1,80	2,09	1,80	2,09
1,20	2,90	1,20	2,73
0,60	5,79	0,60	4,50
0,00	8,69	0,00	6,28

NOTAS:

1) El despeje lateral total es la suma de los correspondientes al lado izquierdo (arcén y mediana) y al derecho (arcén). En caso de ser cualquiera de ellos superior a 1,80 m, se tomará una distancia de análisis de 1,80 m.

2) En carreteras sin mediana, el efecto de esta ausencia está considerado en las medidas realizadas. Por ello, en estos casos debe considerarse un despeje ficticio de 1,80 m en el lado izquierdo.

Tabla 8. Reducción de velocidad libre por tipo de mediana (carreteras multicarril)

Tipo de mediana	Reducción de la velocidad libre (km/h)
Una calzada (sin mediana)	10,60
Dos calzadas (con mediana)	0,00

NOTA: Se considera que existe mediana incluso cuando está ocupada por carriles de giro a la izquierda continuo. Esta disposición es frecuente en EE.UU, pero no en Europa.

justificado adecuadamente con datos objetivos.

6.6. Nivel de servicio

El nivel de servicio del tramo considerado de la autopista se determina con el valor de la densidad de vehículos ligeros, mediante la fórmula:

$$d = I_{eq} / v$$

donde la velocidad (v) se obtiene del gráfico de la figura 1 eligiendo la curva correspondiente a la velocidad libre de la infraestructura, si existe, o interpolando entre las dos más próximas. Una vez determinada la curva, se lee la velocidad correspondiente a I_{eq} en la curva elegida o interpolada.

De optarse por determinar las intensidades de servicio (IS)

correspondientes a cada uno de los niveles, se entraría en la figura a través de las rectas correspondientes a cada densidad, y hallando las velocidades correspondientes a cada nivel de servicio.

$$(IS)_X = (d)_X \cdot (v)_X$$

donde $(d)_X$ es la densidad máxima admisible para el nivel de servicio X, y $(v)_X$ se determina con la figura 1.

7. Carreteras multicarril

7.1. Introducción

El procedimiento empleado en las carreteras multicarril es

similar al de las autopistas, hasta el punto de que las curvas de intensidad-velocidad para condiciones ideales presentan un paralelismo completo.

Se denomina carretera multicarril una infraestructura que, por alguna razón, no reúne todas las características de una autopista. Las características de la circulación en estas infraestructuras son de una velocidad entre 60 y 90 km/h, con dos o tres carriles por calzada, y condiciones de mediana muy variables (desde carriles de giro a la izquierda hasta una barrera rígida, e, incluso, una doble marca vial). Son infraestructuras características de desarrollos suburbanos.

El nivel de servicio se determina a partir de la densidad, como en las autopistas. En el MCC 2000 se unifican los umbrales de cada nivel de servicio en autopista y carretera multicarril, aunque es posible que finalmente se opte por unos umbrales ligeramente mayores para las carreteras multicarril. Esta diferencia respondería al hecho de que las expectativas de los usuarios son menores en las infraestructuras de menor calidad.

La capacidad de las carreteras multicarril, en vehículos ligeros con conductores habituales, oscila entre 1 900 y 2 200 veh./h, dependiendo de la velocidad libre de la carretera.

7.2. Velocidad libre

Al igual que en las autopistas, la velocidad libre en las carreteras multicarril puede medirse o estimarse, siendo preferible la medida. En caso de optar por la estimación, los factores que influyen en una reducción de la velocidad libre en estas infraestructuras son:

- Por anchura de carril.
- Por obstáculos a derecha e izquierda.
- Por tipo de mediana.
- Por frecuencia de accesos.

Por anchura de carril

La reducción de velocidad es la misma que en las autopistas. La anchura insuficiente de carril llega a ocasionar disminuciones de la velocidad de 10,6 km/h si es de 3,0 m. Las reducciones aplicables por este concepto se incluyen en la tabla 2.

Por obstáculos a derecha e izquierda

La reducción de velocidad por presencia de obstáculos tiene un valor máximo de 8,69 km/h cuando el despeje lateral es nulo. La tabla 7 recoge los valores aplicables.

Por tipo de mediana

Si no se dispone de mediana entre ambos sentidos, la reducción de la velocidad libre es de 2,6 km/h. La tabla 8 contiene las reducciones correspondientes.

Por frecuencia de accesos

La presencia de accesos hace reducir la velocidad libre hasta en 16 km/h (ver tabla 9)

Determinación de la velocidad libre

La velocidad libre vendrá dada por la velocidad libre ideal menos las reducciones que sean aplicables, según la fórmula siguiente:

$$V_{\text{libre}} = V_{\text{libre ideal}} - V_{\text{anchura de carril}} - V_{\text{despeje lateral}} - V_{\text{mediana}} - V_{\text{reducción de accesos}}$$

7.3. Intensidad equivalente

Una vez determinada la velocidad ideal, se procede a hallar la intensidad de circulación equivalente, si todos los vehículos fueran ligeros y todos los conductores habituales, de la misma forma que se indicó para el estudio de las autopistas.

7.4. Nivel de servicio

Método de determinación del nivel de servicio

El nivel de servicio se deter-

Puntos de acceso por km	Reducción de la velocidad libre (km/h)
0,00	0,00
6,2	4,02
12,4	8,04
18,6	12,06
24,9	16,09

mina de la misma forma que en las autopistas, mediante las curvas intensidad - velocidad de la figura 3.

8. Carreteras de dos carriles

Uno de los aspectos más relevantes de la renovación es el cambio completo en el análisis de las carreteras de dos carriles, que a partir de la nueva versión del MCC se podrán analizar tomando los dos sentidos en conjunto, como hasta ahora, o separando ambos sentidos. Parece que en el futuro se impondrá el análisis por sentido, dado que las características de algunas carreteras de dos carriles son muy

distintas en un sentido que en el otro, en cuanto a posibilidades de adelantamiento o velocidad de recorrido (piénsese en una carretera de montaña). Por otra parte, la capacidad considerada en estas carreteras crece, pasando del valor actual de 2 800 a un máximo en el entorno de 3 200 vehículos/hora para el conjunto de los dos sentidos.

En este capítulo se definen dos variables críticas: la velocidad y el porcentaje de tiempo demorado, medido a través del porcentaje de intervalos menores que un cierto valor (5 segundos). El nivel de servicio depende ahora de la combinación de las dos variables, lo que constituye una novedad histórica: hasta ahora, el crite-

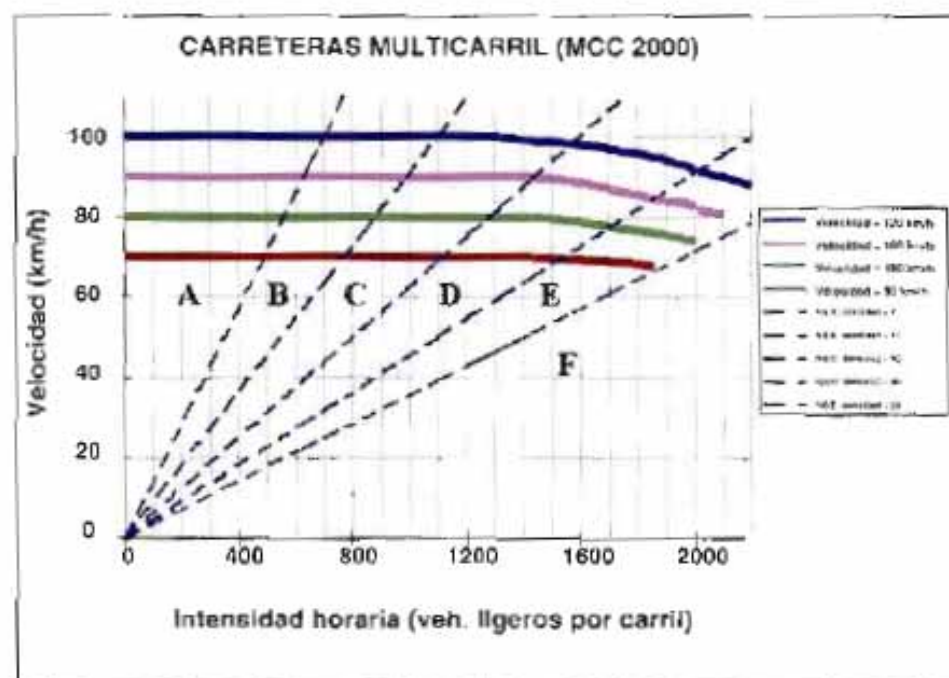


Figura 3. Curvas intensidad - velocidad en carreteras multicarril (MCC 2000).

Tabla 10. Nivel de servicio en carreteras de dos carriles de CLASE I

Nivel de servicio	Porcentaje de tiempo demorado (%)	Velocidad media de recorrido (km/h)
A	< 30	> 90
B	30 – 45	80 – 90
C	45 – 60	70 – 80
D	60 – 75	60 – 70
E	> 75	< 60
F	Cuando se excede la capacidad	

Tabla 11. Nivel de servicio en carreteras de dos carriles de CLASE II

Nivel de servicio	Porcentaje de tiempo demorado (%)
A	< 30
B	30 – 45
C	45 – 60
D	60 – 75
E	> 75
F	Cuando se excede la capacidad

rio del Comité era que el nivel de servicio en cualquier infraestructura se medía con una sola variable principal.

Se tabulan los valores de la equivalencia de vehículos pesados para las dos variables, y, de acuerdo con las medidas realizadas, esta equivalencia no es igual si se considera una variable que si se considera la otra. Debe recordarse que la equivalencia se define como el número de vehículos ligeros que causan el mismo efecto en la corriente circulatoria.

En general, el nuevo manual revisa las equivalencias de los vehículos pesados, disminuyendo el peso de estos vehículos en terrenos llanos y ondulados. Este cambio responde a un hecho real: los camiones y autobuses son capaces ahora de desarrollar velocidades al-

tas, si la pendiente de la carretera no es superior al 3 %.

La metodología propuesta, así como los valores de las distintas variables, han sido obtenidos a partir de estudios de campo, simulación en el ámbito microscópico (esto es, simulando el comportamiento de cada conductor y vehículo individual) y consideraciones teóricas.

8.1. Metodología de evaluación

El Manual divide las carreteras de dos carriles en dos clases:

- Clase I: Carreteras en las que los usuarios esperan viajar a velocidades elevadas. Ejemplos de ello son las carreteras interurbanas que unen núcleos importantes de población, carreteras de

circulación diaria para viajes de casa al trabajo, o vías de conexión entre autopistas. En general, las distancias recorridas en carreteras de Clase I son largas, o están dentro de viajes largos.

- Clase II: Al contrario, son carreteras en las que los usuarios NO esperan viajar a velocidades elevadas. Ejemplos de ello son las vías de acceso a carreteras de Clase I, carreteras turísticas o de recreo y similares. En general, las distancias recorridas en carreteras de Clase II son cortas, y están situadas en los extremos de la ruta (el principio o el final del viaje), o bien se trata de viajes de recreo en periodos de vacaciones o fines de semana.

La clasificación, así realizada, es funcional, si bien el factor principal para clasificar una carretera determinada es que ésta se realiza por el usuario del Manual. El nivel de servicio se determina mediante dos tablas, según la clasificación de la vía (tablas 10 y 11). En el caso de las carreteras de Clase I, el nivel de servicio es el peor de los obtenidos con las dos variables de control.

En resumen, el método consiste en:

1. Clasificar la carretera en Clase I o II.
2. Medir o estimar el porcentaje de tiempo demorado (que se considera igual al porcentaje de vehículos que circulan por una sección representativa del tramo —el autor de este texto aconseja que sea la sección de salida— con un intervalo precedente, medido entre comienzos de vehículos, menor de 5 segundos).
3. Si la vía es de Clase I, medir o estimar la velocidad media de recorrido.
4. Obtener el nivel de servicio.



Carretera de dos carriles Rasquera - Ginestar.

9. Otros aspectos destacados

Por último, destaca la extensión dedicada a la simulación, con una introducción que se ha considerado necesaria para muchos Ingenieros de Tráfico, que hasta ahora sólo operaban con hojas de cálculo y gráficas. A continuación, se ofrecen algunos ejercicios de simulación numérica, para terminar con ejemplos de aplicación. Con estos capítulos se intenta desarrollar la familiaridad de los analistas con la simulación, que tendrá cada vez más importancia en el análisis de la circulación. La simulación permite tener en cuenta las peculiaridades de cada caso, que quedan enterradas en el análisis tradicional.

10. Tendencias futuras

Las tendencias futuras más marcadas el manual son varias; pero apuntan a una doble vertiente: por un lado, la unificación del estudio de infraestructuras de distintos tipos, de forma que se aborde el estudio de corredores o incluso áreas completas; por otro, la previ-

sible mayor importancia de la simulación, para poder considerar más variables en el estudio de situaciones concretas.

Las infraestructuras se complican a medida que crece la congestión y que se imponen más restricciones al vehículo privado. Aparecen las vías reservadas a autobuses o vehículos de alta ocupación, bien durante todo el día o, como es más habitual, en horas punta. Además, las actuaciones en una infraestructura del corredor influyen sobre los demás corredores paralelos, ya sea captando tráfico, modificando los hábitos de los conductores, o generando tráfico nuevo (demanda inducida). Por tanto, el estudio de corredores completos hará necesario poder combinar estudios de vías arteria-

Las infraestructuras se complican a medida que crece la congestión y que se imponen más restricciones al vehículo privado

les, intersecciones importantes, segmentos básicos de autopista, trenzados y transporte público. Será importante que en esta combinación no existan disparidades entre la valoración del corredor global y la de cada uno de los elementos que lo componen. Ello exigirá la consideración de variables descriptivas comunes (como podría ser la densidad), o, en su defecto, el establecimiento de umbrales equivalentes entre distintas variables, lo que no es sencillo en la práctica.

Por su parte, la disponibilidad creciente de datos automatizados, ordenadores que los procesan, y memoria hacen viable la elaboración de modelos complejos que no pueden aplicarse mediante formularios y reglas simples. La traducción de valores de tablas por fórmulas de interpolación, o la simple programación de las tablas, dan más potencia y singularización al análisis. Además, la simulación da resultados que en la vida real no pueden medirse (como, por ejemplo, niveles de intensidad de circulación próximos a la saturación y conductores habituales en un área recién construida, aún sin habitar). La potencia y la sencillez de la herramienta la hacen muy prometedora; pero tiene un inconveniente que puede ser grave para el Manual: las herramientas de simulación están desarrolladas por compañías privadas e independientes, que compiten entre sí en calidad y en subprogramas adicionales. Si el Comité los incluye en el Manual, que, como se ha mencionado, será distribuido en CD-ROM ¿debe incluirlos todos? ¿O ninguno? ¿O dar un listado que nunca puede ser completamente exacto, dado lo cambiante del panorama? Por otro lado, si se impulsa la adopción de procedimientos complejos que obligan a la simulación ¿no

hay que dar ninguna herramienta? ¿Quizá una primitiva? En los próximos años veremos surgir las respuestas a estos interrogantes.

Otro aspecto interesante es la evolución experimentada en el Manual de elegir variables descriptivas más próximas a las que elige el usuario. Y estas son principalmente la velocidad media y la demora. Quizá lo que cuenta para los viajeros, y especialmente para los conductores, es sobre todo a qué velocidad pueden viajar con un margen de seguridad adecuado (¿y personal, esto es, variable entre distintos individuos?). Desde luego, estas son las razones que hacen adoptar un cambio de horario o itinerario. Por el contrario, los gestores y administradores, así como los grupos de presión, prefieren aumentar el peso de la seguridad, en detrimento de la velocidad. Estas presiones continuarán y se acrecentarán en el futuro, y habrá que tenerlo en cuenta. Es posible que se adopte un primer criterio de seguridad: si el registro de accidentes es elevado, será necesario actuar con independencia de otras consideraciones. Sólo donde se haya contenido la siniestralidad se realizarán mejoras basadas en otros análisis.

El adelantamiento es una maniobra empleada por muchos conductores (y no sólo por una pequeña fracción, los más rápidos) para disminuir la demora, aumentar la velocidad de viaje y disminuir el tiempo de interacción con otros vehículos. Es posible que en el futuro este razonamiento lleve a la inclusión de las oportunidades de adelantamiento.

Por último, no se puede ignorar que la adopción de un sistema de evaluación no es una medida objetiva y pura en sí. En realidad, es una medida política, que tiene que ver con las inversiones que se realiza-



La decisión de construir una infraestructura es política. La valoración técnica, que debe ser estricta, es sólo uno de los ingredientes.

rán en una red. Si el resultado de la evaluación es satisfactorio, la inversión necesaria es escasa. Pero ¿en qué plazo? ¿Debe adelantarse la inversión para mejorar antes las carreteras? En este caso es aceptable adoptar criterios de valoración más estrictos. En caso contrario, no. En ocasiones, se decide construir una infraestructura, y se pide una justificación de su vida útil válida sin tener en cuenta el crecimiento real previsible del tráfico. En otras ocasiones se hace crecer las expectativas de intensidad futura para justificar la construcción de una infraestructura, o al menos su adelanto en el tiempo. El resultado final debe ser un equilibrio entre la valoración y la decisión política.

11. Bibliografía

- [1] BOX, P. C. y OPPENLANDER, J. C. (1976). "Manual for Traffic Engineering Studies". Cuarta Edición, Institute of Transportation Engineers, Arlington, Virginia, EE.UU.
- [2] KRAEMER, C., SÁNCHEZ BLANCO, V., ROCCI, S., y GARDETA OLIVEROS, J.G. (1997) "Carreteras I: Tráfico y Trazado". Colección Escuelas. Servicio de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- [3] MAY Jr., A.D. (1990): "Traffic flow fundamentals". Prentice Hall, New Jersey.
- [4] L.J. PIGNATARO (1975): "Traffic Engineering. Theory and Practice". Prentice Hall, New Jersey.
- [5] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1998): "Special Report 209: Highway Capacity Manual". TRB, National Research Council, Washington, D.C. (Existe traducción en español de la edición de 1994: "Manual de Capacidad de Carreteras". Asociación Técnica de Carreteras, Madrid, 1995. Traducción de Gardeta Oliveros, J.G. y Gardeta Oliveros, G.)
- [6] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1999): "HCM 2000" (borrador).
- [7] VALDÉS, A. et. al. (1982). "Ingeniería de Tráfico". Tercera edición corregida y aumentada. Dossat, Madrid. ■