

ARTICULO

CARRETERAS DE DOS CARRILES

Nuevo manual de capacidad

Por: JUAN G. GARDETA OLIVEROS
PAULINO VILLEGAS MARTINEZ
MARIANO GULLON LOW
CARLOS GASCA ALLUE
SEBASTIAN DE LA RICA CASTEDO
VICTOR SANCHEZ BLANCO *



Con este artículo se pretende ofrecer al lector un compendio del nuevo modelo (realmente modelos) que el Manual de Capacidad 1986 propone para su utilización en el análisis de las carreteras de dos carriles. La metodología utilizada se aparta claramente de la seguida en el Manual 1965, aunque adopta un formato parecido en su presentación.

El equipo redactor está en la actualidad contrastando estos valores con la realidad de nuestras carreteras españolas, esperando poder hacer en breve, un juicio sobre la utilidad final de los modelos y tablas aquí presentadas para nuestra red.

Durante los últimos 20 años se ha estado proyectando, analizando y explotando nuestras carreteras (y las del resto del mundo) a través de la óptica y normativa emanada del Manual de Capacidad Americano de 1965 (Highway Capacity Manual) ¹. En este tiempo han surgido discrepancias con este modelo, que con mayor o menor

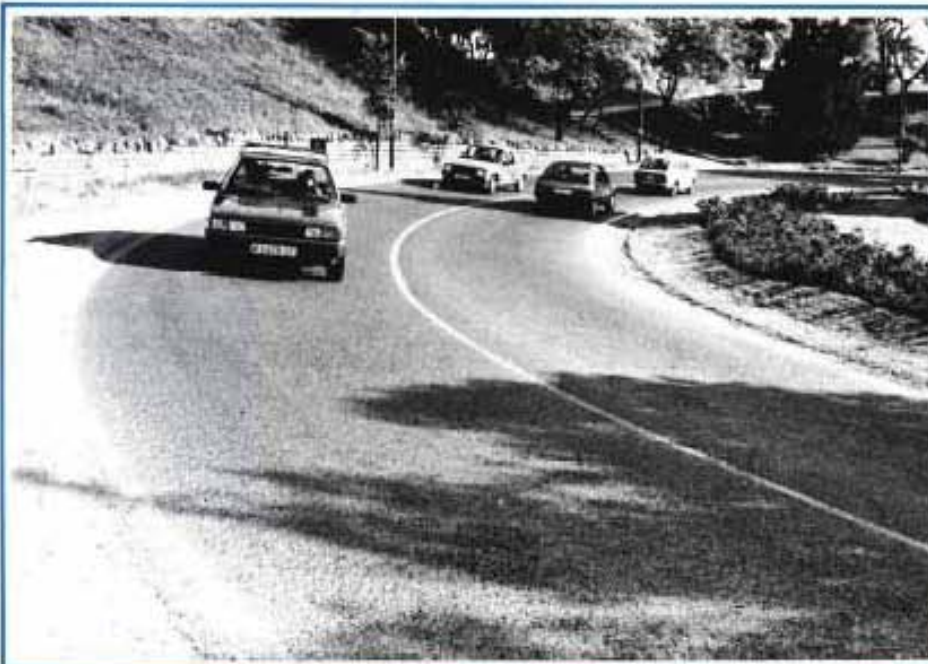
intensidad han solicitado una reconsideración de las teorías en las que se basaba aquel documento de trabajo. Sus autores —el Transportation Research Board— en un modelo de lo que debe constituir una labor de investigación eficazmente desarrollada —comenzaron un programa de comprobación, estudio y seguimiento del

uso de su Manual junto a investigaciones ya desde 1965. En ese esfuerzo se han revisado no sólo las experiencias y estudios propios de aquella nación —los EE.UU. de América del Norte— sino que en un movimiento singular para un organismo de aquel país y más meritorio por ello, han acudido a todo tipo de fuentes, y fundamentalmente las Europeas. Fruto de ello ha sido la «botadura» de un nuevo Manual en 1985; éste incorpora nuevas metodologías a problemas antiguos, nuevos problemas no contemplados anteriormente y nuevos parámetros y datos básicos basados en una experiencia real en el análisis operativo de las carreteras, que supera ya los cincuenta años.

Entre los temas contemplados por este Manual de Capacidad de Carreteras 1985 ², están las carreteras bidireccionales de dos carriles (en adelante carreteras de dos carriles); estas carreteras, y su explotación, son un tema vital en la política de transportes de cualquier país, y en particular en España, pues habitualmente suponen un porcentaje, en kilómetros de vía, superior al 90 por 100 de la red. Por ello se ha creído conveniente comenzar con este tema la presentación en RUTAS de los distintos aspectos que el Manual de Capacidad incorpora. Esperamos con ello propiciar un rápido uso de las nuevas técnicas viarias en nuestro país, lo cual redundará en una mejor explotación, selección de inversiones, etc. y en definitiva en la dotación de un mejor servicio a la sociedad que requiere los servicios de las carreteras.

1. Carreteras de Dos Carriles

Una carretera de dos carriles puede definirse como una calzada que tiene un carril para cada uno de los dos sentidos de circulación. El adelantamiento de los vehículos más lentos, requiere la invasión del carril del sentido opuesto siempre que la



2. Enfoque del Manual 1985 y Características

El Manual antiguo, asumía en base a sus investigaciones que la IMD direccional de una carretera de dos carriles era aproximadamente idéntica para cada uno de los sentidos. Por ello utilizaba como unidad de trabajo la intensidad total de calzada, hablando, pues, de IMD total de calzada, además establecía un valor tope a la intensidad posible, o capacidad, independiente del reparto del tráfico, por carril cifrado en 2.000 vehículos ligeros total de calzada a la hora (vl/h).

A los efectos de planeamiento aconsejaba evaluar los volúmenes futuros tomando como base la intensidad durante la hora punta. Esta intensidad la evaluaba en general, como un porcentaje de la IMD, o factor de la hora de proyecto, determinado habitualmente por el valor de la hora 30, o bien de una hora entre la 10.^a y la 50.^a:

$$I = \text{IMD} \times F_h \quad (1)$$

siendo,

I = Intensidad horaria de diseño en el tramo analizado

IMD = Intensidad media diaria total de ambos sentidos

F_h = Factor de hora de proyecto (en general en la hora 30, $I_{H30} = \text{IMD} \cdot F_h$)

Ofrecía el Manual 1965 sendos gráficos representativos de las distribuciones de velocidad para los distintos niveles de servicio en este tipo de carreteras (Fig. 1 y 2) y las curvas típicas intensidad-velocidad en circulación ininterrumpida para distintas situaciones de la distancia de visibilidad, en base a las cuales definía los límites de los distintos niveles de servicio (NS), los cuales estaban determinados por el tipo de circulación, velocidad de operación, distancia de visibilidad de adelantamiento y relación intensidad-capacidad (I/C). (Tabla 0).

En cuanto al cálculo de la capacidad y la determinación del nivel de servicio para este tipo de carretera en circulación continua, el Manual de Capacidad 1965 establecía una cifra total, independientemente del reparto por sentido, de 2.000 v/h., para una carretera cumpliendo unas condiciones predeterminadas denominadas «ideales». Esta cifra se vería disminuida a través de unos factores de corrección cuando las condiciones eran menos favorables para una circulación continua y cómoda. En consecuencia la capacidad se definía así:

$$c = 2.000 f_A \cdot f_G \cdot f_{VP} \quad (2)$$

TABLA 0. NIVELES DE SERVICIO EN CARRETERAS DE DOS CARRILES

Nivel de servicio	Velocidad de operación	Longitud visibilidad de adelant., %	i/c Velocidad específica (km/h)				
			110	90	80	70	65
A	≥ 100 km/h	100	≤ 0.20				
		80	≤ 0.18				
		60	≤ 0.15	(I)	(I)	(I)	(I)
		40	≤ 0.12				
		20	≤ 0.08				
B	> 80 km/h	0	≤ 0.04				
		100	≤ 0.45	≤ 0.40		(I)	(I)
		80	≤ 0.42	≤ 0.35	(I)	(I)	(I)
		60	≤ 0.38	≤ 0.30			
		40	≤ 0.34	≤ 0.24			
C	≥ 65 km/h	20	≤ 0.30	≤ 0.18			
		0	≤ 0.24	≤ 0.12			
		100	≤ 0.70	≤ 0.66	≤ 0.56	≤ 0.51	
		80	≤ 0.68	≤ 0.61	≤ 0.53	≤ 0.46	(I)
		60	≤ 0.65	≤ 0.56	≤ 0.47	≤ 0.41	
		40	≤ 0.62	≤ 0.51	≤ 0.38	≤ 0.32	
		20	≤ 0.59	≤ 0.45	≤ 0.28	≤ 0.22	
		0	≤ 0.54	≤ 0.38	≤ 0.18	≤ 0.12	

(I) No es posible obtener este nivel de servicio
Capacidad = 2.000 veh./h. (ambos sentidos)

distancia de visibilidad y los intervalos huecos de la circulación en el sentido opuesto lo permitan. A medida que aumentan la intensidad de circulación y/o las restricciones geométricas, disminuye la posibilidad de adelantar, dando lugar a la formación de columnas (1) en la circulación.

Estas carreteras pueden tener un gran abanico de posibles funciones, el más amplio de todos los tipos viarios existentes, en todas las áreas geográficas, satisfaciendo una amplia gama de necesidades de circulación.

Por un lado las carreteras importantes de dos carriles, uniendo núcleos importantes de tráfico o funcionando como conectores de primer orden entre las redes nacionales y de orden inferior, deben propor-

cionar movilidad y a coste relativamente bajo, requiriéndose para ello altas velocidades sostenidas y escasas demoras por adelantamientos.

Otras tienen que proporcionar accesibilidad, en cualquier condición meteorológica, a zonas concretas, dando servicio por lo general a intensidades bajas y sin que la velocidad sea un factor importante.

Un tercer grupo tiene una función turística para la cual ni se espera ni se desean altas velocidades, sino un trazado seguro que permita disfrutar del entorno.

Finalmente existen pequeños tramos de carreteras de dos carriles que soportan fuertes volúmenes por dar servicio entre núcleos urbanos o por servir de conexión entre carreteras multicarril.

siendo,

- c = capacidad en vehículos ligeros a la hora;
- f_A = factor de ajuste por anchura diferente a la ideal;
- f_0 = factor de ajuste por obstáculos a distancia inferior a la ideal;
- f_{VP} = factor de ajuste por existencia en la circulación de un porcentaje de vehículos pesados superior al ideal.

Cada nivel de servicio (NS) ofrecía una máxima intensidad de servicio (MIS) en condiciones ideales definida a través de la relación I/C , para un 100 por 100 de longitud con visibilidad de adelantamiento, de la capacidad en condiciones ideales,

$$MIS_X = (I/C)_X \cdot 2.000, \quad (3)$$

la cual se veía igualmente reducida ante situaciones inferiores a las ideales, lo que ponía de manifiesto aplicando unos coeficientes f_A , f_0 , f_{VP} , que eran a su vez dependientes del nivel de servicio, y ajustando la relación (I/C) a la situación de visibilidad del tramo en estudio, siendo entonces

$$I_X = (I/C)_{X,i} \cdot 2.000 \cdot f_{A,X} \cdot f_{0,X} \cdot f_{VP,X} \quad (4)$$

Esta ecuación 4 permitía calcular la intensidad de servicio, o intensidad límite superior para un nivel de servicio X dado de forma directa; o bien permitía determinar el nivel de servicio en el que se estaba explotando una carretera en un momento dado, despejando el valor (I/C) y entrando en la **Tabla 1**, aunque la dependencia de los factores de ajuste del nivel de servicio convertía esta determinación en un proceso de ensayo y error algo más largo.

2.1. Problemas del Manual 1965

Varios inconvenientes se han manifestado contra algunos aspectos de este modelo del Manual 1965, aunque aceptándose siempre su gran potencia como sistema de análisis para las carreteras de dos carriles. Entre ellos los más notoriamente expresados han sido:

a) Discordancia entre la cifra de capacidad ideal dado por el Manual de 2.000 v.l/h., y la obtenida en algunos casos no americanos, en los cuales se pudieron obtener regímenes de operaciones cercanos a la capacidad; en concreto en España² se obtuvieron valores cercanos a 2.900 v.l/h. (Figura 3).

b) La escasa variación presentada en estas carreteras en la velocidad de operación ante variaciones amplias de la inten-

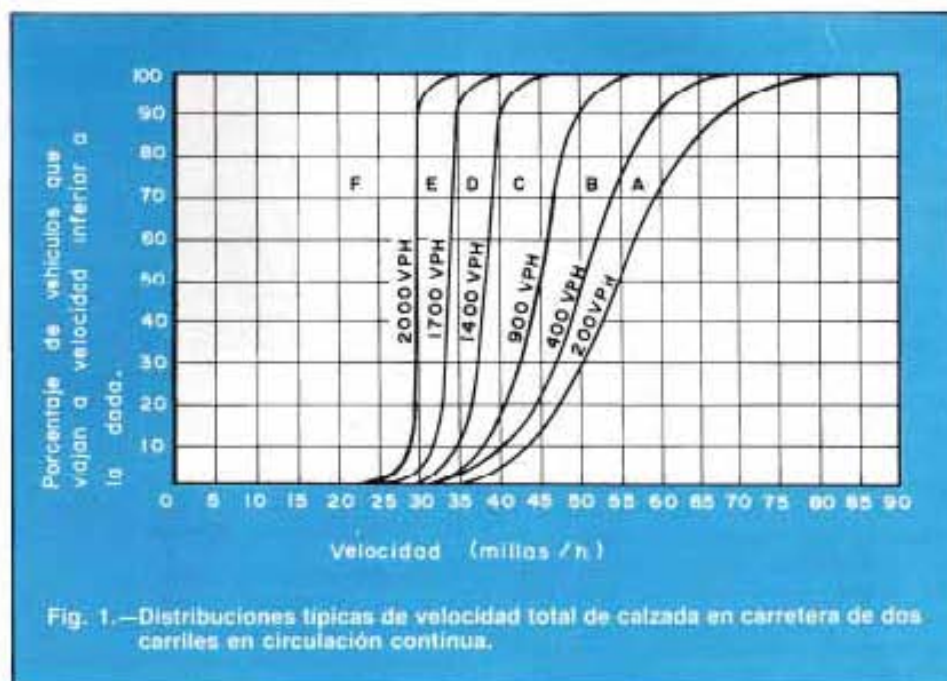


Fig. 1.—Distribuciones típicas de velocidad total de calzada en carretera de dos carriles en circulación continua.

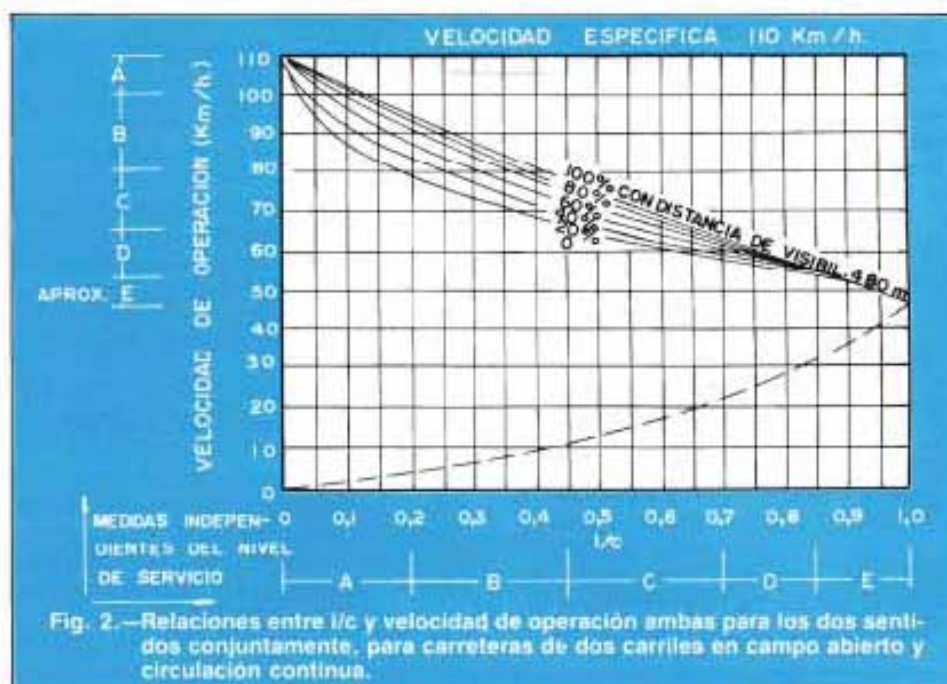


Fig. 2.—Relaciones entre I/C y velocidad de operación ambas para los dos sentidos conjuntamente, para carreteras de dos carriles en campo abierto y circulación continua.

sidad, y por lo tanto la peligrosa elección de una única variable (la velocidad de operación) como camino para la definición del nivel de servicio.

c) La definición de la capacidad independientemente del reparto de vehículos por sentido, hecho también estudiado por otros autores obteniendo valores distintos (Figura 4).

d) La escasa correlación entre los valores del factor de ajuste de vehículos pesados f_{VP} y más concretamente del factor de equivalencia de vehículos pesados E_C (equivalentes de camiones) y E_A (equivalentes de autobuses), dado por el Manual 1965 y los que en distintos estudios de campo que se obtuvieron en bastantes países, especialmente europeos⁴.

3. Enfoque del Manual de Capacidad 1985 y Características

El Manual de Capacidad 1985 entiende que dadas las múltiples funciones de una carretera de dos carriles (y la poca sensibilidad de la velocidad media de recorrido (2) —utilizada en esta edición en sustitución de la velocidad de operación— como discriminador del nivel de servicio) es preciso utilizar más de una variable para describir la calidad del servicio. Para ello escoge tres variables:

1. **La velocidad media de recorrido**, definida como la longitud del segmento de carretera considerado, dividida por el tiempo medio de duración del viaje de todos los vehículos que lo recorren en ambos

sentidos durante un determinado lapso de tiempo (día, hora, etc.), es un reflejo del nivel al que la carretera satisface su función de movilidad. En carreteras importantes el criterio utilizado para definir el nivel de servicio se apoyará más en esta variable, siendo de desear velocidades medias superiores a 80 km/h. en terreno llano.

2. **El porcentaje de demora en tiempo**, refleja simultáneamente las dos funciones de movilidad y accesibilidad, y se define como el valor medio del tiempo de su recorrido durante el cual todo vehículo está sufriendo una demora al viajar en columna como consecuencia de la imposibilidad de adelantar. Como esta variable es de difícil medición en el terreno, se puede utilizar como sucedáneo en estudios de campo el porcentaje de vehículos que circulan a intervalos inferiores a 5 segundos. Esta variable refleja la calidad de servicio percibida por los conductores ante una amplia gama de características geométricas y de tráfico; así con bajas intensidades la demanda de adelantamiento es baja, los intervalos largos y la posibilidad de adelantamiento alto, por lo que el porcentaje de demora es prácticamente nulo; por el contrario al acercarse a la capacidad la demanda de adelantamiento es superior a la posibilidad de hacerlo, por lo que se forman columnas, y el porcentaje del tiempo de recorrido durante el cual debe circularse a velocidad inferior a la deseada por efecto de la columna es casi del 100 por 100, y aunque la velocidad puede ser relativamente alta (alrededor de 65 km/h.) la frustración de los conductores sería excesiva si estas condiciones se mantuvieran durante largos períodos de tiempo.

3. **La capacidad utilizada** es un reflejo de la función de accesibilidad y se define como la relación entre la intensidad de la demanda y la capacidad de la carretera.

Los criterios que definen el nivel de servicio (NS) utilizan los tres parámetros anteriores, considerándose el porcentaje de

demora en tiempo como la variable de medida esencial para la calidad del servicio, quedando las otras dos como medidas secundarias.

La **Figura 5** muestra las relaciones básicas entre velocidad de recorrido, intensidad y el porcentaje de demora en tiempo utilizadas por el Manual.

Como en el resto del Manual 1985, se considera el tráfico en los períodos punta, para lo cual se escoge como período representativo el de los 15 minutos más cargados. Por tanto se opera en intensidades de circulación definidas como las intensidades de los 15 minutos punta de la hora expresada en vehículos ligeros a la hora.

3.1. Condiciones Ideales

Define el Manual de Capacidad 1985 como carreteras ideales de dos carriles aquellas que no tienen elementos restrictivos, provengan éstos del trazado, del entorno, o de la propia circulación, y específicamente las que tengan:

1. Velocidad de proyecto igual o superior a 96 km/h.,
2. Carriles de anchura igual o superior a 3,60 m.,
3. Arcenes de anchura igual o superior a 1,80 m.,
4. Inexistencia de tramos con prohibición de adelantamiento,
5. Circulación compuesta únicamente por vehículos ligeros (tipo turismo),
6. Reparto homogéneo del tráfico por sentidos de circulación (50 por 100 - 50 por 100),
7. Inexistencia de restricción a la circulación debida a sistemas de control o a vehículos que giran,
8. Terreno llano.

La capacidad de las carreteras de dos carriles en estas condiciones ideales se establece, por definición, en 2.800 v.l./h. (vehículos ligeros a la hora) total de calzada.

$$C = 2.800 \text{ v/h.} \quad (5)$$

Incluye pues como condición ideal, a diferencia del Manual anterior, una única velocidad del proyecto, así como un reparto concreto y único del 50-50. Por tanto para repartos desequilibrados acepta una capacidad inferior a ésta aunque siempre superior a 2.000 v.l./h. como se indica a continuación (**Figura 6**):

Reparto	Capacidad total	Capacidad/capacidad ideal
50/50	2.800	1,00
60/40	2.650	0,94
70/30	2.500	0,89
80/20	2.300	0,83
90/10	2.100	0,75
100/0	2.000	0,71

Como tramo con prohibición de adelantamiento se define todo tramo con línea continua en el eje, o cuando no hay marcas viales, a cualquier segmento de la carretera en el que la distancia de visibilidad es igual o menor de 450 m. En los cálculos se utiliza el porcentaje medio de tramos con prohibición de adelantar en ambas direcciones, el cual oscila entre 20 y el 50 por 100 en carreteras rurales y se acerca a 100 en las que transcurren por terreno montañoso.

Las otras condiciones ideales son idénticas a las especificadas para las condiciones ideales del Manual 1965.

3.2. Tramos con Características Geométricas Normales

Se definen estos tramos en el Manual 1985 como aquellos segmentos de carretera que no tienen simultáneamente las dos características siguientes: a) que sean rampas de inclinación superior al 3 por 100; y b) que su longitud sea superior a 800 metros.

Allí en donde estas dos características se cumplan, se estará ante un caso espe-

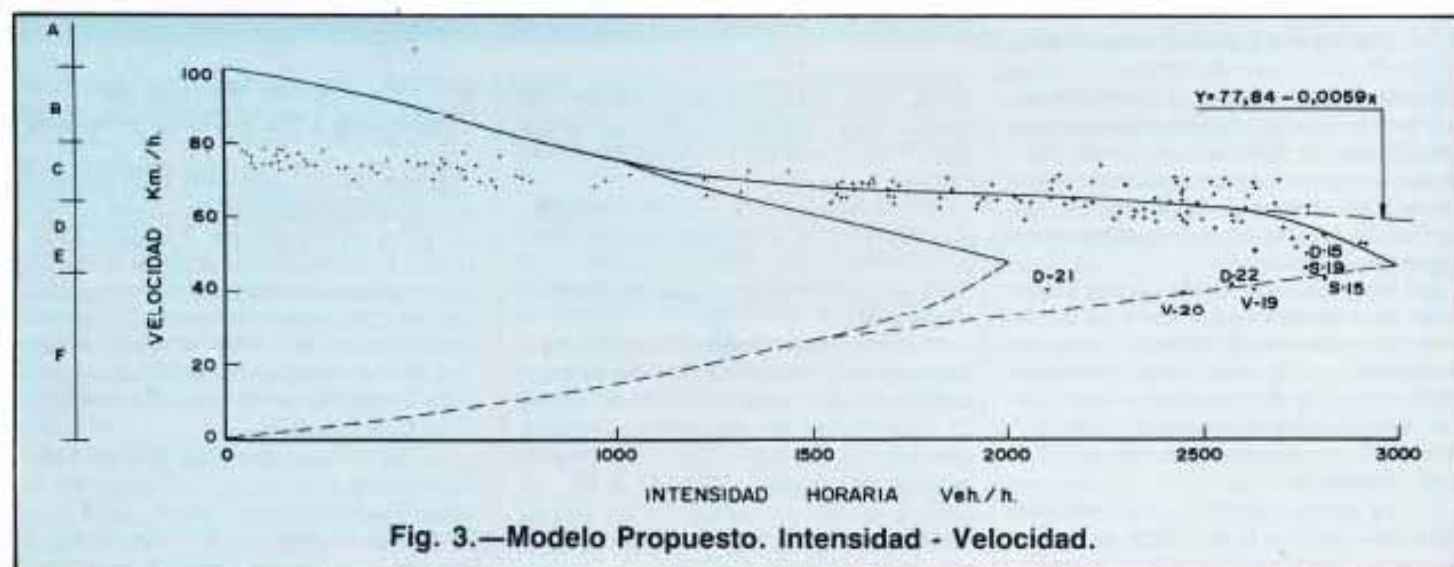


Fig. 3.—Modelo Propuesto. Intensidad - Velocidad.

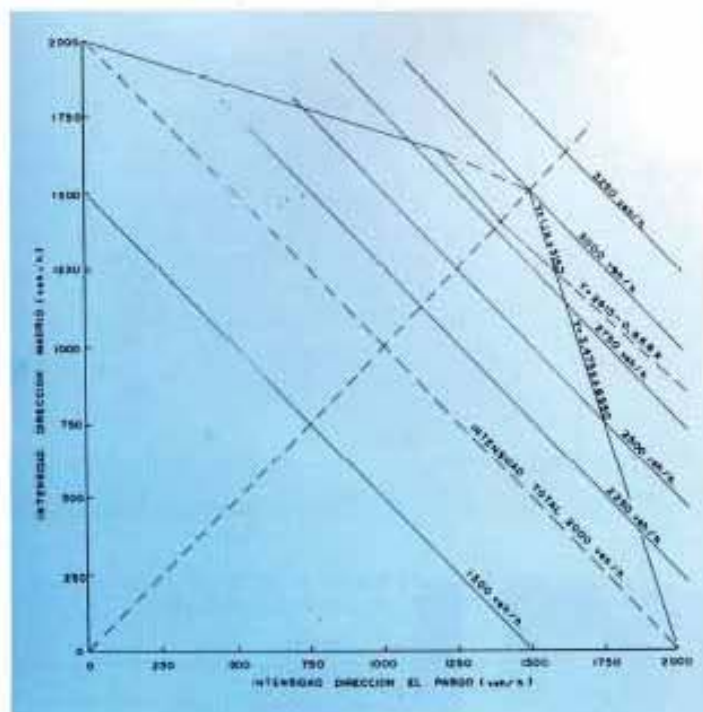


Fig. 4.—Modelo de Capacidad, en función del reparto propuesto.

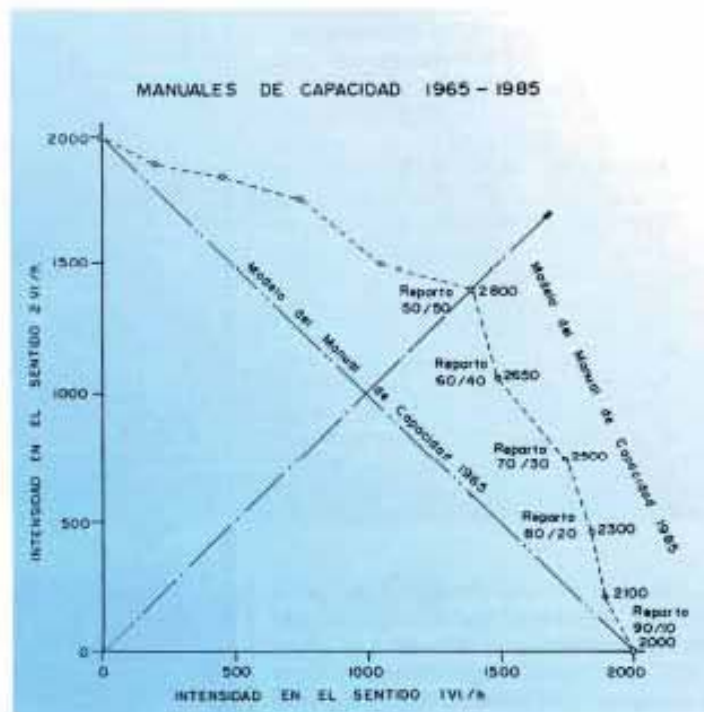


Fig. 5.—Modelos de capacidad en carreteras de dos carriles en función del reparto por sentido.

cífico al que se le aplicará un procedimiento de análisis especial, descrito en el apartado 4.5.

4. Niveles de Servicio

La definición de los niveles de servicio en el Manual 1985 utiliza conjuntamente los conceptos de movilidad y accesibilidad a través de las tres variables antes definidas. La medida esencial de la calidad del servicio es el porcentaje de demora en tiempo (o su sustituto, el porcentaje de intervalos menores de 5 segundos), utilizándose la velocidad y la relación intensidad/capacidad como secundarias. Los criterios de nivel de servicio se definen para periodos punta de 15 minutos y están pensados para aplicar a tramos de longitud significativa (al menos de 3 km).

La **Tabla 1** muestra los criterios para definir los niveles de servicio para tramos de condiciones geométricas normales. Como variable que marca el dominio general del NS aparece el porcentaje de demora en tiempo. Con carácter más secundario aparece la velocidad media de recorrido, la cual varía ligeramente, dentro de cada NS, en función del tipo de terreno, y la relación I/C, siendo C, para facilidad de cálculo, la capacidad ideal total de calzada (2.800 vehículos ligeros/hora).

Los criterios de NS que aparecen en la **Tabla 1** se refieren a tramos largos en carreteras rurales de dos carriles en las que el objeto o funcionalidad principal de la vía

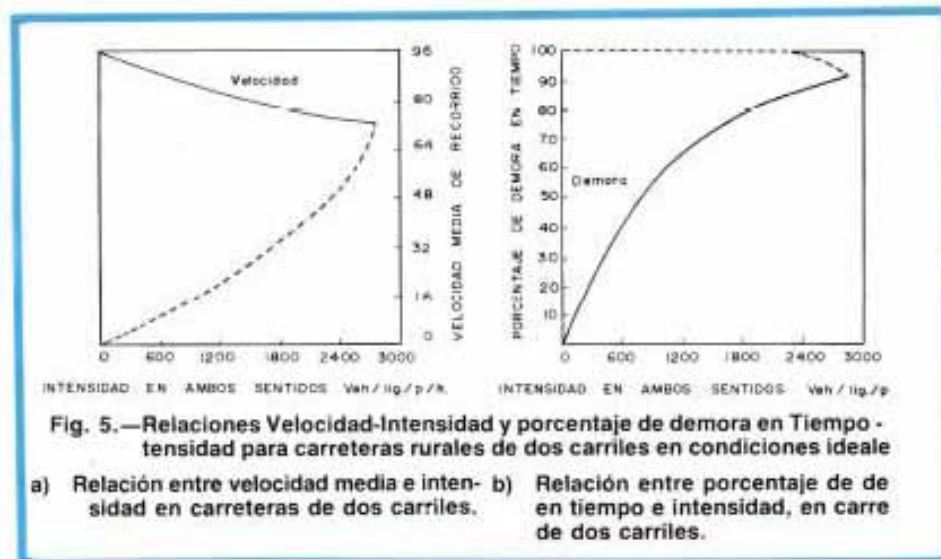


Fig. 5.—Relaciones Velocidad-Intensidad y porcentaje de demora en Tiempo - intensidad para carreteras rurales de dos carriles en condiciones ideales

- a) Relación entre velocidad media e intensidad en carreteras de dos carriles. b) Relación entre porcentaje de demora en tiempo e intensidad, en carreteras de dos carriles.

NS Dem.	TERRENO LLANO						TERRENO ONDULADO						TERRENO MONTAÑOSO								
	V _m	% prohib. adelantat						V _m	% prohib. adelantat						V _m	% prohib. adelantat					
		0	20	40	60	80	100		0	20	40	60	80	100		0	20	40	60	80	100
A < 30	≥ 83	15	12	08	07	06	04	≥ 81	15	10	07	06	04	03	≥ 90	14	09	07	04	02	01
B < 45	≥ 68	27	24	21	19	17	16	≥ 66	25	23	19	17	15	13	≥ 82	25	20	16	13	12	10
C < 60	≥ 62	43	39	36	34	33	32	≥ 62	42	39	35	32	30	28	≥ 78	38	33	28	23	20	16
D < 75	≥ 80	64	62	60	59	56	57	≥ 76	62	57	52	48	46	43	≥ 70	58	50	45	40	37	33
E < 75	≥ 72	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	≥ 94	87	84	82	81	80	80	≥ 58	81	81	81	82	80	76
F 100	≥ 72	—	—	—	—	—	—	< 94	—	—	—	—	—	—	< 56	—	—	—	—	—	—

TABLA 1. CRITERIOS DE NIVEL DE SERVICIO PARA TRAMOS DE CARRETERAS DE DOS CARRILES DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS NORMALES. Valores de la relación I/C.

NOTAS: Relación I/C referida a la capacidad ideal de 2.000 veh/h/p/h entre ambos sentidos.

V_m = Velocidad media de todos los vehículos en km/h para carreteras con velocidad de proyecto ≥ 80 km/h. Para carreteras con velocidad de proyecto más bajas reducir la velocidad en 9,4 km/h por cada 10 km/h de reducción en la velocidad de proyecto por debajo de los 80 km/h. Se admite que la velocidad no está restringida por ningún tipo de reglamentación.

es proporcionar una movilidad de forma eficiente. Allí donde las velocidades que den restringidas por la normativa de circulación vigente o por la señalización, como es el caso en una travesía, los únicos indicadores significativos del nivel de servicio son el porcentaje de demora en tiempo y la capacidad utilizada (I/C).

La Tabla 1 es autosuficiente para definir los niveles. Es sin embargo importante percibir en todo su valor las cifras presentadas del porcentaje de demora en tiempo como límites de los NS, y meditar sobre ella. Se está, por ejemplo, en un nivel B, según el Manual, cuando durante el 44 por 100 del tiempo de recorrido del usuario medio, en un tramo de longitud significativa se está sufriendo una demora producida por una circulación en columna; cifra esta alta quizás para la percepción y gusto de un usuario concreto, y probablemente más acorde con las expectativas de un servicio aceptable desde el punto de vista del agente encargado de la explotación. Dentro de este mismo nivel de servicio, y por ejemplo para terreno llano se exige, con esa demora, una velocidad media de recorrido superior a 88 km/h, y unas intensidades entre 448 y 756 vl/h. Ello implica unas densidades totales de calzada entre 5 y 9 vl/km., lo que no son cifras altas, aunque impidiéndose el adelantamiento y circulación en columna, a altas velocidades. A la vista de esto, creemos que llevará un tiempo habituarse a pensar a nivel técnico en estas coordenadas y a visualizar el efecto real que ello comporta, a la vez que será preciso estudiar el comportamiento de nuestras carreteras y tráfico y su ajuste a este patrón de comportamiento.

4.1. Factor de Hora Punta

Los criterios de la Tabla 1 se refieren, como se ha indicado anteriormente, a las intensidades de circulación o intensidades



horarias equivalentes basadas en un periodo punta de 15 minutos dentro de la hora punta, que es la que se suele considerar, es decir son 4 veces el volumen de tráfico del cuarto de hora punta de la hora.

Por lo tanto, en el cálculo los volúmenes horarios deben transformarse en intensidades de circulación, incluyendo el efecto del periodo punta de los 15 minutos, de la forma siguiente:

$$I = Q / FHP \quad (6)$$

siendo

I = Intensidad de circulación equivalente a la del cuarto de hora más cargado en v/h.



Q = Volumen horario de la hora considerada (que suele ser la punta), en v/h.

FHP = Factor de hora punta, obtenido anteriormente de forma estadística en ese tramo mediante la fórmula $FHP = Q / (4 \times Q_{15})$, en donde Q_{15} , es el volumen de los 15 minutos más cargados en v/15 min.

Normalmente se espera que el dominio definido por la Tabla 1 se verifique en el tramo estudiado durante los 15 minutos punta. En muchas aplicaciones es posible que a juicio del analista sea suficiente con que se esté dentro del dominio en media durante la hora, lo cual implicaría que si se está por ejemplo en el nivel C, en algu-

1. CALCULO DEL NIVEL DE SERVICIO

Intensidad Horaria Total 2 sentidos	Factor de hora Punta FHP	Intensidad Horaria Total 2 sentidos	Factor de hora Punta FHP
100	0,83	1.000	0,93
200	0,87	1.100	0,94
300	0,90	1.200	0,94
400	0,91	1.300	0,94
500	0,91	1.400	0,94
600	0,92	1.500	0,95
700	0,92	1.600	0,95
800	0,93	1.700	0,95
900	0,93	1.800	0,95
		≥ 1.900	0,96

2. CALCULO DE LAS INTENSIDADES DE SERVICIO

Nivel de servicio	A	B	C	D	E
Factor de Hora Punta	0,91	0,92	0,94	0,95	1,00

TABLA 2. FACTORES DE HORA PUNTA PARA CARRETERAS DE DOS CARRILES BASADOS EN CIRCULACION EN CONDICIONES ALEATORIAS

Distribución por sentidos	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50
Factor de ajuste F_R	0,71	0,75	0,83	0,89	0,94	1,00

TABLA 3. FACTORES DE AJUSTE PARA DISTRIBUCION POR SENTIDOS EN TRAMOS DE CARACTERISTICAS GEOMETRICAS NORMALES.

ANCHURA UTIL DEL ARCEN	CARRILES 3,6 m		CARRILES 3,3		CARRILES 3 m		CARRILES 2,7 m	
	NIVEL SERV.		NIVEL SERV.		NIVEL SERV.		NIVEL SERV.	
	A-D	E	A-D	E	A-D	E	A-D	E
1,8	1,00	1,00	0,93	0,94	0,84	0,87	0,70	0,76
1,2	0,92	0,97	0,85	0,92	0,77	0,85	0,65	0,74
0,6	0,81	0,93	0,75	0,88	0,60	0,81	0,57	0,70
0,0	0,70	0,80	0,65	0,82	0,58	0,75	0,49	0,66

TABLA 4. FACTORES DE AJUSTE PARA EL EFECTO COMBINADO DE CARRILES Y ARCENES ESTRECHOS F_A .

NOTAS. Cuando la anchura del arcén derecho es distinta a la del arcén izquierdo, tomar el valor medio.
Los valores para el Nivel de servicio E se aplican para todas las velocidades inferiores a 72 km/h.

nos períodos de la hora se estará en A u B, y en otros en D o E. La decisión de utilizar intensidades horarias o de circulación vendrá aconsejada por las características de la punta dentro de la hora y su mayor o menor capacidad para producir perturbaciones o fluctuaciones. En general cuando el factor de hora punta es inferior a 0,85 las condiciones de la circulación variarán substancialmente dentro de la hora.

Cuando el factor de hora punta pueda obtenerse con datos locales «in situ» deberá hacerse así. Cuando estos datos no estén disponibles, se pueden utilizar los valores tabulados en la Tabla 2, los cuales están basados en la hipótesis de aleatoriedad de la circulación y pueden ser algo más altos que los datos de campo. Cuando tenga que calcularse el NS para un volumen

de tráfico dado, se elegirá un valor apropiado a este volumen de la Tabla 2. Cuando se tenga que calcular la intensidad de servicio el valor se tomará de la Tabla 3, al ser desconocido el volumen.

4.2. Análisis de Tramos

La metodología general calcula el funcionamiento del tráfico a lo largo de un tramo de la carretera para el terreno y trazado medios existentes en el tramo, y para el tráfico que circula por él.

El tramo debe ser de longitud superior a 3 km. definiéndose el perfil longitudinal a través de las tres posibles definiciones de terreno —llano, ondulado y montañoso— y del porcentaje de carretera con pro-

hibición de adelantamiento, que puede aproximarse, si no se dispone del dato, mediante el porcentaje de recorrido con distancia de visibilidad inferior a 450 metros, considerando ambos sentidos. El perfil transversal se define por las anchuras de carril y arcén utilizables. Los datos sobre velocidad de proyecto y rampas específicas no se usan directamente, sino que van implicados en otros factores geométricos analizados.

Los datos de tráfico necesarios para aplicar el método son la intensidad horaria total de calzada, el factor de hora punta, el reparto por sentidos, y la composición del tráfico en las tres clasificaciones que prevé el Manual —vehículos pesados tipo camión, autobuses y vehículos recreativos (3)—. Cuando no se conozca la composición, el Manual aconseja a sus usuarios utilizar los porcentajes siguientes:

$P_C = 14$ por 100; $P_B = 0$
 $P_A = 4$ por 100.

4.3. Fórmula General

La fórmula general que define el funcionamiento de la circulación en tramos de características geométricas normales sigue un modelo idéntico al ya tradicional del Manual 1965, con el formato siguiente:

$$I_X = 2.800 \times (I/C)_X \times f_R \times f_A \times f_{VP} \quad (7)$$

siendo,

f_R = factor de ajuste dependiente del reparto del tráfico por sentidos, obtenido de la Tabla 3.

f_A = factor de ajuste debido al efecto combinado de carriles y arcenes de dimensión inferior a la ideal, obtenido de la Tabla 4.

f_{VP} = Factor de ajuste debido a la presencia de los vehículos pesados.

$(I/C)_X$ = Relación intensidad/capacidad ideal para el nivel X, obtenida en la Tabla 1.

I_X = Intensidad para el nivel de servicio X en vehículos ligeros a la hora total de calzada, para las condiciones de la carretera y de la circulación prevalecientes.

Parte de la capacidad ideal para transformarla, mediante los factores de ajuste, en la capacidad real del tramo y convertirla a través del $(I/C)_X$ en la intensidad para el NS_X.

Como aspectos dignos de resaltar cabe mencionar que las relaciones (I/C) para la capacidad no son iguales a 1 en terreno ondulado o montañoso, debido a que el valor C (ideal) es inalcanzable en esos terrenos. Asimismo los valores de f_R están tomados de la Figura 6, anteriormente presentada.

Los valores de la Tabla 1 están referidos a vehículos ligeros considerando co-

% PENDIENTE	VELOCIDAD MEDIA DE SUBIDA	PORCENTAJE DE PROHIBICION DE ADELANTAR					
		0	20	40	60	80	100
3	88 km/h	0,27	0,23	0,19	0,17	0,14	0,12
	84 km/h	0,42	0,38	0,33	0,31	0,29	0,27
	80 km/h	0,64	0,59	0,55	0,52	0,49	0,47
	72 km/h	1,00	0,95	0,91	0,88	0,86	0,84
	68 km/h	1,00	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
	64 km/h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	88 km/h	0,25	0,21	0,18	0,16	0,13	0,11
	84 km/h	0,40	0,36	0,31	0,29	0,27	0,25
	80 km/h	0,61	0,56	0,52	0,49	0,47	0,45
	72 km/h	0,97	0,92	0,88	0,85	0,83	0,81
	68 km/h	0,99	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
	64 km/h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	88 km/h	0,21	0,17	0,14	0,12	0,10	0,08
	84 km/h	0,36	0,31	0,27	0,24	0,22	0,20
	80 km/h	0,57	0,49	0,49	0,41	0,39	0,37
	72 km/h	0,93	0,84	0,79	0,75	0,72	0,70
	68 km/h	0,97	0,90	0,87	0,85	0,83	0,82
	64 km/h	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
	56 km/h	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	88 km/h	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04
	84 km/h	0,27	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13
	80 km/h	0,48	0,40	0,35	0,31	0,28	0,26
	72 km/h	0,49	0,76	0,68	0,63	0,59	0,55
	68 km/h	0,93	0,84	0,78	0,74	0,70	0,67
	64 km/h	0,97	0,91	0,87	0,83	0,81	0,78
	56 km/h	1,00	0,96	0,95	0,93	0,91	0,90
	48 km/h	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98
7	88 km/h	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	84 km/h	0,13	0,10	0,08	0,07	0,05	0,04
	80 km/h	0,34	0,27	0,22	0,18	0,15	0,12
	72 km/h	0,77	0,65	0,55	0,46	0,40	0,35
	68 km/h	0,86	0,75	0,67	0,60	0,54	0,48
	64 km/h	0,93	0,82	0,75	0,69	0,64	0,59
	56 km/h	1,00	0,91	0,87	0,82	0,79	0,76
	48 km/h	1,00	0,95	0,92	0,90	0,88	0,86

TABLA 5. VALORES DE LA RELACION I/c, CON RELACION A LA VELOCIDAD, PORCENTAJE DE PENDIENTE DE LA RAMPA Y PORCENTAJE DE LOS TRAMOS DE PROHIBICION DE ADELANTAR PARA RAMPAS ESPECIFICAS.

Relación de intensidad a la capacidad ideal de 2.800 veh./lig./p/h, asumiendo que la circulación de vehículos ligeros no está afectada por la rampa.

NOTA: Para valores intermedios del porcentaje de prohibiciones de adelantar, interpolar. Redondear el porcentaje de pendiente al valor entero superior.

mo tales los que tienen 4 ruedas en contacto con el pavimento. El factor de vehículo pesado se calcula por el procedimiento tradicional

$$f_{VP} = \frac{1 + P_C(E_C - 1) + P_R(E_R - 1) + P_B(E_B - 1)}{1} \quad (8)$$

donde,

P_C, P_R y P_B = Tanto por 100 de camiones, vehículos recreativos y autobuses.

E_C, E_R y E_B = equivalentes de camiones, vehículos recreativos y autobuses, obtenido de la Tabla 6.

4.4. Procedimiento para Rampas Singulares

El Manual 1985 considera como rampas singulares las que tienen inclinación superior al 3 por 100 y simultáneamente tienen una longitud superior a 800 metros.

El método supone que la aproximación a la rampa es horizontal, estando la circulación de subida muy influenciada por la rampa, mientras que en los vehículos descendentes el impacto es menor.

Los niveles de servicio de la Tabla 1 se pueden aplicar en este caso con la salvedad de que la velocidad se refiere a la de

los vehículos en la rampa (subiendo). La circulación en rampa es compleja puesto que las mismas causas que producen las columnas tienden a restringir la posibilidad de adelantamiento, comportándose así mismo peor los vehículos ligeros en rampa que en llano. Por ello la determinación de la capacidad o nivel E no es sencillo, pues la velocidad correspondiente puede estar entre 40 y 64 km/h. en función del tanto por 100 de inclinación, el tanto por 100 del tramo con prohibición de adelantamiento y de otros factores.

La fórmula general de la intensidad de servicio para una determinada velocidad de subida media es la siguiente:

$$I_x = 2.800 \times (I/C)_x \times f_R \times f_A \times f_{VP} \times f_L \quad (9)$$

siendo:

f_L = El factor de ajuste para tener en cuenta los efectos de las rampas sobre la circulación de ligeros, calculada como se verá más adelante.

$(I/C)_x$ = Relación intensidad capacidad para el NS_x obtenido de la **Tabla 5**.

f_R = Factor de ajuste por reparto obtenido de la **Tabla 5**.

f_{VP} = Calculado como se verá más adelante y los demás factores como en la fórmula (7).

4.4.1. Relación i/c

En la **Tabla 5** se indican los valores de la relación i/c referidos al porcentaje de prohibición de adelantar. Estos valores indican la relación de la intensidad a la capacidad ideal de 2.800 vehículos ligeros por hora y suponen que los vehículos ligeros no se ven afectados por las rampas largas. Se aplica otro ajuste para tener en cuenta el impacto de la rampa sobre la circulación de vehículos ligeros. Esto es importante porque una relación $i/c = 1,00$ en la **Tabla 5** no significa necesariamente que se

alcance la capacidad. La solución para la capacidad en una rampa larga se analiza después. Sin embargo, las soluciones para la capacidad o para intensidades de servicio que exceden de 2.000 vehículos ligeros por hora indican que la rampa específica no está afectando a la circulación y debería utilizarse la fórmula para el terreno de características geométricas normales.

Los valores de i/c próximos o iguales a 0,00 significan que la velocidad media de

subida que le corresponde es difícil o imposible de alcanzar para los porcentajes de pendiente y de prohibición de adelantar indicados.

4.4.2. Ajuste para distribución por sentidos (f_R)

En rampas largas la distribución por sentidos puede ser un factor crítico que afea

TIPO DE VEHICULO	NIVEL DE SERVICIO	TIPO DE TERRENO		
		LLANO	ONDULADO	MONTAÑOSO
CAMIONES	A	2,0	4,0	7,0
	B y C	2,2	5,0	10,0
	D y E	2,0	5,0	12,0
RECREATIVOS	A	2,2	3,2	5,0
	B y C	2,5	3,9	5,2
	D y E	1,6	3,3	5,2
AUTOBUSES	A	1,8	3,0	5,7
	B y C	2,0	3,4	6,0
	D y E	1,6	2,9	6,5

TABLA 6. EQUIVALENTES EN VEHICULOS LIGEROS DE CAMIONES; VEHICULOS RECREATIVOS Y AUTOBUSES PARA CARRETERAS DE DOS CARRILES EN TRAMOS DE CONDICIONES GEOMETRICAS NORMALES.

% PENDIENTE	LONGITUD DE LA RAMPA	VELOCIDAD MEDIA DE SUBIDA EN km/h					
		88	84	80	72	64	48
0	TODAS	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	1,3
3	400 m	2,9	2,3	2,0	1,7	1,6	1,5
	800 m	3,7	2,9	2,4	2,0	1,8	1,7
	1.200 m	4,8	3,6	2,9	2,3	2,0	1,9
	1.600 m	6,5	4,6	3,5	2,6	2,3	2,1
	2.400 m	11,2	6,6	5,1	3,4	2,9	2,5
	3.200 m	19,8	9,3	6,7	4,6	3,7	2,9
	4.800 m	71,0	21,0	10,8	7,3	5,6	3,8
	6.400 m	x	48,0	20,5	11,3	7,7	4,9
4	400 m	3,2	2,5	2,2	1,8	1,7	1,6
	800 m	4,4	3,4	2,8	2,2	2,0	1,9
	1.200 m	6,3	4,4	3,5	2,7	2,3	2,1
	1.600 m	9,6	6,3	4,5	3,2	2,7	2,4
	2.400 m	19,5	10,3	7,4	4,7	3,8	3,1
	3.200 m	43,0	16,1	10,8	6,9	5,3	3,8
	4.800 m	x	48,0	20,0	12,5	9,0	5,5
	6.400 m	x	x	51,0	22,8	13,8	7,4
5	400 m	3,6	2,8	2,3	2,0	1,8	1,7
	800 m	5,4	3,9	3,2	2,5	2,2	2,0
	1.200 m	8,3	5,7	4,3	3,1	2,7	2,4
	1.600 m	14,1	8,4	5,9	4,0	3,3	2,8
	2.400 m	34,0	16,0	10,8	6,3	4,9	3,8
	3.200 m	91,0	28,3	18,4	10,2	7,8	4,8
	4.800 m	x	x	37,0	22,0	14,6	7,8
	6.400 m	x	x	x	55,0	25,0	11,5
6	400 m	4,0	3,1	2,5	2,1	1,9	1,8
	800 m	6,5	4,8	3,7	2,8	2,4	2,2
	1.200 m	11,0	7,2	5,2	3,7	3,1	2,7
	1.600 m	20,4	11,7	7,8	4,9	4,0	3,3
	2.400 m	60,0	25,2	16,0	8,5	6,4	4,7
	3.200 m	x	50,0	28,2	15,3	10,7	6,3
	4.800 m	x	x	70,0	38,0	23,9	11,3
	6.400 m	x	x	x	90,0	45,0	18,1
7	400 m	4,5	3,4	2,7	2,2	2,0	1,9
	800 m	7,9	5,7	4,2	3,2	2,7	2,4
	1.200 m	14,5	9,1	6,3	4,3	3,6	3,0
	1.600 m	31,4	16,0	10,0	6,1	4,8	3,8
	2.400 m	x	39,5	23,5	11,5	8,4	5,8
	3.200 m	x	88,0	46,0	22,0	15,4	8,2
	4.800 m	x	x	x	66,0	38,5	16,1
	6.400 m	x	x	x	x	x	28,0

TABLA 7. EQUIVALENCIAS EN VEHICULOS LIGEROS PARA RAMPAS ESPECIFICAS EN CARRETERAS DE DOS CARRILES.

La x significa que esa velocidad no se puede alcanzar con esa pendiente y longitud.

ta a la circulación. La **Tabla 8** contiene factores de ajuste para una oscilación de distribución por sentidos, con un porcentaje significativo (mínimo 30 por 100) de vehículos de subida.

4.4.3. Ajuste para carriles y arcones estrechos (f_A)

La influencia de carriles y arcones estrechos en las rampas es la misma que para los tramos de condiciones geométricas normales. El factor apropiado se selecciona de la **Tabla 4** presentada anteriormente.

4.4.4. Ajuste para vehículos ligeros en rampas (f_l)

Los valores l/c de la **Tabla 5** admiten que los vehículos ligeros mantendrán su velocidad en las rampas si no se lo impiden los de delante. Estudios recientes han comprobado que la circulación de vehículos ligeros se ve afectada por las rampas, aún cuando no estén en circulación vehículos pesados. El factor f_l ajusta los valores l/c de la **Tabla 8** para tener en cuenta este efecto. El factor se calcula así:

$$f_l = \frac{1}{1 + P_L \times I_P}$$

donde:

f_l = Factor de ajuste para la circulación de vehículos ligeros en rampas.

P_L = Proporción de vehículos ligeros en el tráfico de subida, expresada en tanto por uno.

I_P = Factor de impedancia para vehículos ligeros calculados por la fórmula $I_P = 0,02 (E/E_0)$.

E = Equivalente básico de vehículos ligeros para una pendiente de rampa dada, una longitud dada y una velocidad dada, obtenida de la **Tabla 7**.

E_0 = Equivalente básico de vehículos ligeros para pendiente 0 y una determinada velocidad, obtenida de la **Tabla 7**.

Los equivalentes de vehículos ligeros de la **Tabla 7** se usan para ambos factores de ajuste de vehículos ligeros (f_l) y de vehículos pesados (f_p).

El factor de ajuste de vehículos ligeros f_l modifica las relaciones básicas l/c , que asumen que las rampas no influyen en la circulación de vehículos ligeros, para tener en cuenta esa influencia.

4.4.5. Ajuste para vehículos pesados en la circulación

El factor de ajuste para vehículos pesados se calcula como sigue:

$$f_{VP} = \frac{1}{1 + P_{VP}(E_P - 1)}$$

donde:

f_{VP} = Factor de ajuste por la presencia de vehículos pesados en la circulación de subida.

P_{VP} = Proporción total de vehículos pesados (camiones + recreativos + autobuses) en la circulación de subida.

E_P = Equivalente de vehículos ligeros para la mezcla específica de vehículos pesados existentes en la circulación de subida, calculada:

$$E_P = 1 + (0,25 + P_{C/P})(E - 1)$$

$P_{C/P}$ = Proporción de camiones entre los vehículos pesados, es decir, porcentaje de camiones sobre el total de pesados (camiones + recreativos + autobuses).

E = Equivalente básico en vehículos ligeros para un cierto porcentaje de pendiente de rampa, longitud de rampa y velocidad, obtenida de la **Tabla 7**.

NOTAS

(1) Se denomina «columna» a una cola móvil que circula por un carril, formada por un vehículo lento en cabeza seguido de otro u otros, uno detrás de otro formando la columna, que esperan el momento propicio para efectuar el adelantamiento de forma ordenada.

(2) La velocidad media de recorrido es la velocidad media en recorrer un tramo, contabilizando el tiempo de paradas si éstas se producen. En circulación continua en el tramo estable coincide con la velocidad media en movimiento puesto que no hay paradas.

La velocidad media en movimiento es la velocidad media en recorrer un tramo, sin contabilizar el tiempo de parada si este se produce.

(3) Los vehículos recreativos son los utilizados para el turismo de acampada y otros, y en general constan de un pequeño remolque. Por camión se entiende todo vehículo con 6 o más ruedas.

* Los autores han formado un equipo dentro del seno de la AIPCR al objeto de estudiar y difundir a la mayor brevedad, la metodología del nuevo Manual de Capacidad, habiéndose desarrollado hasta el momento seis cursos dirigidos por los técnicos especialistas en diversas provincias españolas y estando en redacción varios artículos sobre este mismo tema.

PORCENTAJE DE TRAFICO DE SUBIDA

FACTOR DE AJUSTE F_R

100	0,58
90	0,64
80	0,70
70	0,78
60	0,87
50	1,00
40	1,20
30	1,50

TABLA 8. FACTOR DE AJUSTE PARA DISTRIBUCION POR SENTIDOS EN RAMPAS ESPECIFICAS FR.

BIBLIOGRAFIA

1. Highway Research Board, Special Report 87, Highway Capacity Manual 1965, Washington, D. C.; 1965.
2. Highway Research Board, Special Report 209, Highway Capacity Manual 1985, Washington, D. C.; 1985.
3. Gardeta Oliveros, Juan G.; Estudio de Modelos de Tráfico Vial para Carreteras Bidireccionales de Dos Carriles; Tesis Doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1983.
4. Evaluación de posibles mejoras en el nivel de servicio del Paso de Despeñaperros (CN-4), febrero 1977 (Documento interno MOPU).
5. O.C.D.E. Circulación por vías de gran capacidad, 1984.