



CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN AUTOPISTAS

Highway Capacity Manual 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
ROSARIO

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS,
INGENIERIA Y AGRIMENSURA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL

Ing. Jorge Felizia

Definición de Autopista

- Infraestructura que posee dos o más carriles por sentido para uso exclusivo del tránsito y con control total de accesos y egresos.
- Volúmenes que circulan en sentidos opuestos permanentemente separados por barreras físicas.
- El flujo que se desarrolla es totalmente ininterrumpido, no existen interferencias externas.
- Los ingresos y egresos se realizan a través de ramas diseñadas para maniobras de convergencia y divergencia a alta velocidad.

Componentes de una Autopista

- Tramos básicos de autopista: secciones que no están afectadas por maniobras de divergencia o convergencia próximas a ramas o maniobras de entrecruzamiento.
- Zonas de entrecruzamiento: secciones en las cuales se cruzan las trayectorias de 2 o más flujos de tránsito. Se forman cuando lugares de convergencia están próximos a los de divergencia, o cuando una rama de entrada es seguida por una rama de salida conectadas por un carril auxiliar continuo.
- Uniones de ramas: puntos de unión de las ramas de entrada y salida con la autopista. Son lugares de turbulencia.



Consideraciones generales

En los procedimientos se asumen las siguientes condiciones:

- a) Buen estado de la calzada
- b) Ausencia de incidentes de tránsito
- c) Buenas condiciones climáticas

Definiciones

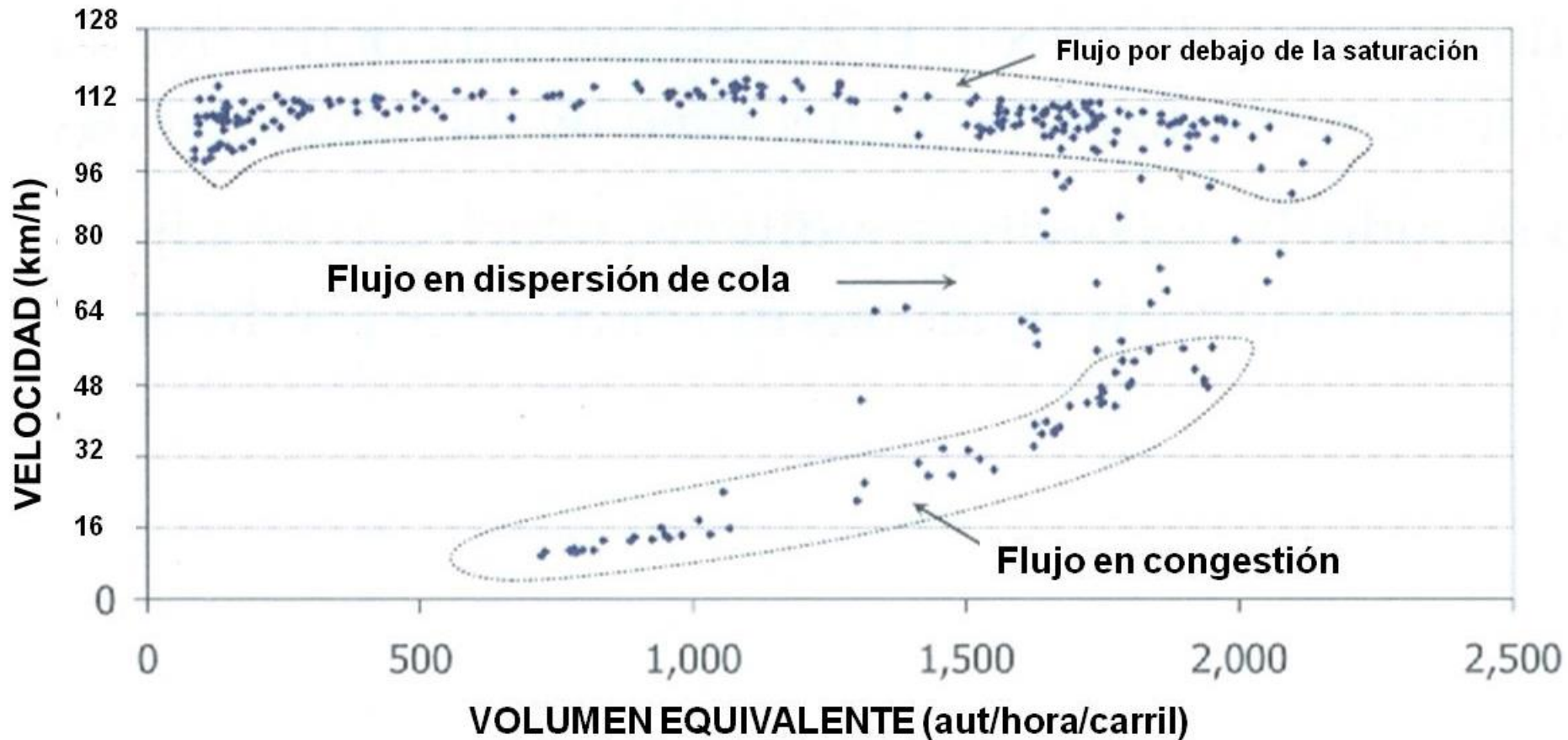
- **Capacidad de la autopista:** es el valor máximo sostenido de flujo (15') en un punto o segmento uniforme para las condiciones prevalecientes de tránsito y calzada. Se define por sentido de circulación y se expresa en automóviles por hora por carril.
- **Características del camino:** son las características geométricas del segmento de autopista, como número y ancho de carriles, obstrucciones laterales en banquetas, distancia entre distribuidores, pendientes y configuraciones del perfil transversal.
- **Condiciones del tránsito:** cualquier característica de la corriente de tránsito que afecte la capacidad, la velocidad en flujo libre o la operación (composición del tránsito, distribución en los carriles, características de los conductores).
- **Velocidad en flujo libre:** velocidad media que circulan los automóviles cuando los volúmenes equivalentes son bajos o moderados, en un tramo uniforme de autopista, bajo las condiciones prevalecientes del camino y del tránsito.

Características del flujo de tránsito

El flujo de tránsito se caracteriza en tres tipos:

- **Flujo libre** condiciones de tránsito que no están afectadas por cuellos de botella. Rangos de velocidad que van de 90 a 120 km/hora con volúmenes equivalentes bajos y rangos de 70 a 100 km/hora con volúmenes equivalentes altos.
- **Volumen de dispersión de la cola** tránsito que recién ha pasado por un cuello de botella y está acelerando para volver a alcanzar la velocidad en flujo libre. La descarga de la cola es un flujo relativamente estable. Se encuentra en volúmenes entre 2000 y 2300 automóviles/h/carril, con velocidades entre 55 km/h y la velocidad en flujo libre. El volumen equivalente de dispersión de la cola es aproximadamente 5% menor que el se observa antes del problema.
- **Tránsito en congestión** flujo influenciado por un cuello de botella aguas abajo. El volumen en un régimen de congestión varía en un amplio rango y también las velocidades según la severidad del cuello de botella. Los vehículos se mueven lentamente, con detención y movimientos.

Características del flujo de tránsito



Nota: I-405, Los Ángeles, California

Fuente: Departamento de Transporte de California, 2008

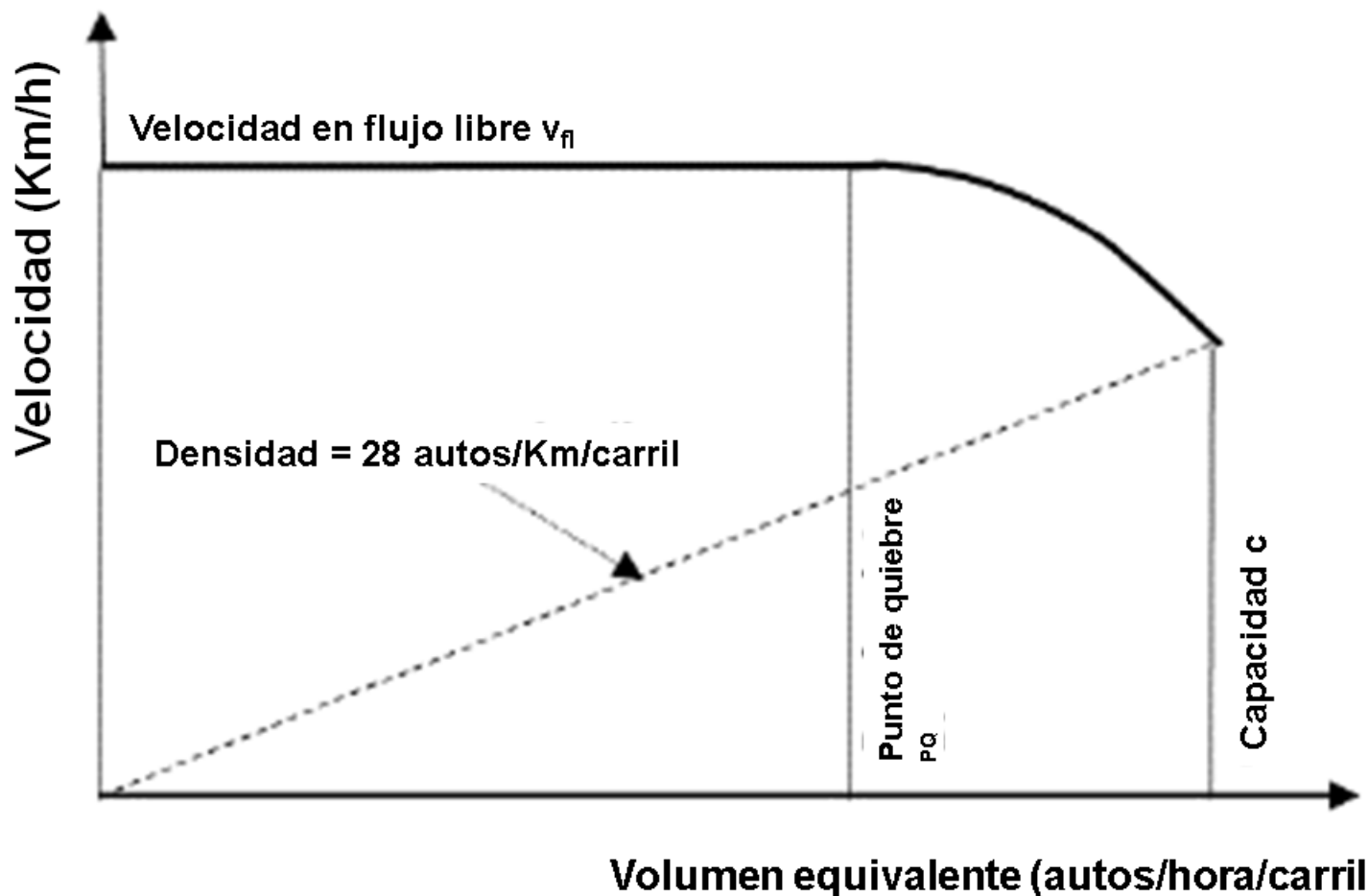
Condiciones básicas

Las características básicas de condiciones ideales:

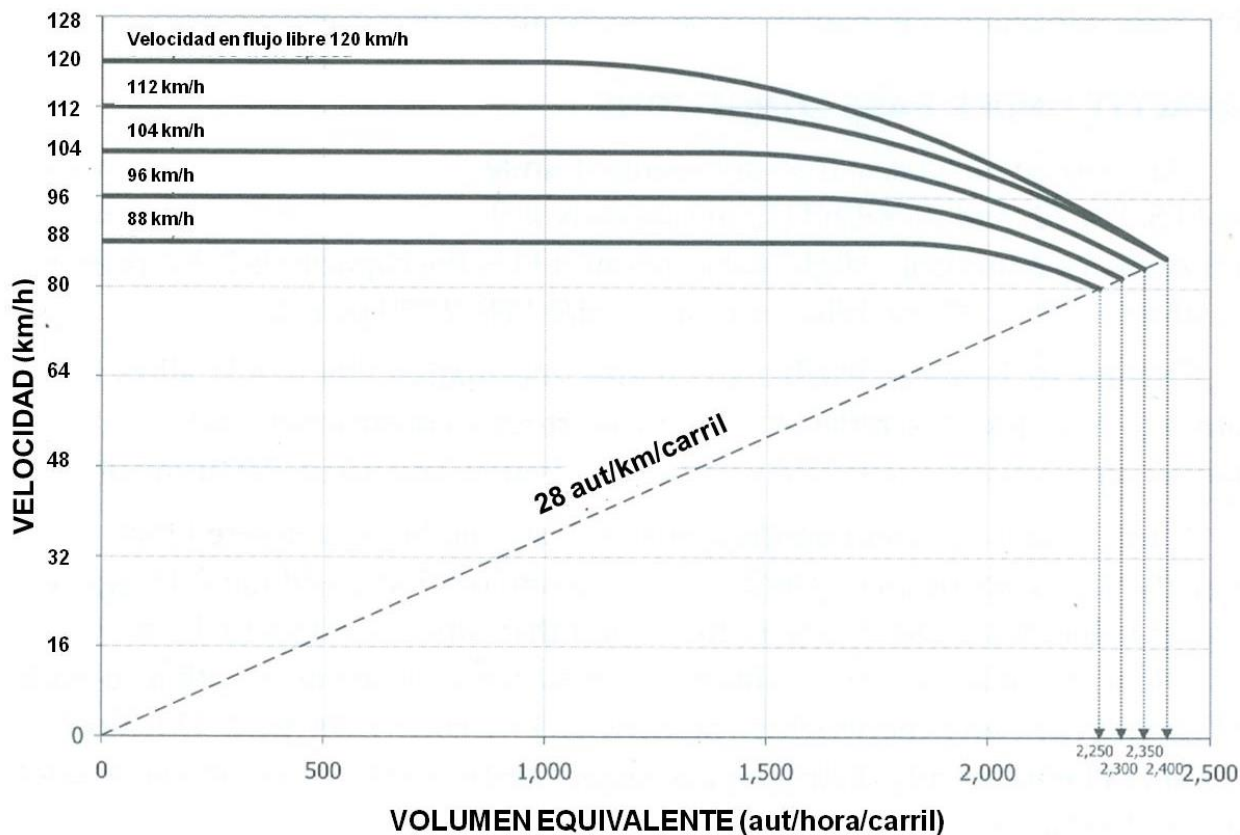
- Ancho de carril: 3,6m.
- Distancia lateral mínima: 1,80m entre el borde del carril y el obstáculo. La distancia mínima al separador central de 0,60m.
- Corriente vehicular compuesta únicamente por automóviles.
- Conductores diarios o regulares.
- Sin distribuidores.
- Terreno llano con pendientes no superiores al 2%.

Curvas Volumen-Velocidad

Figura 1: Forma general de la curva volumen - velocidad

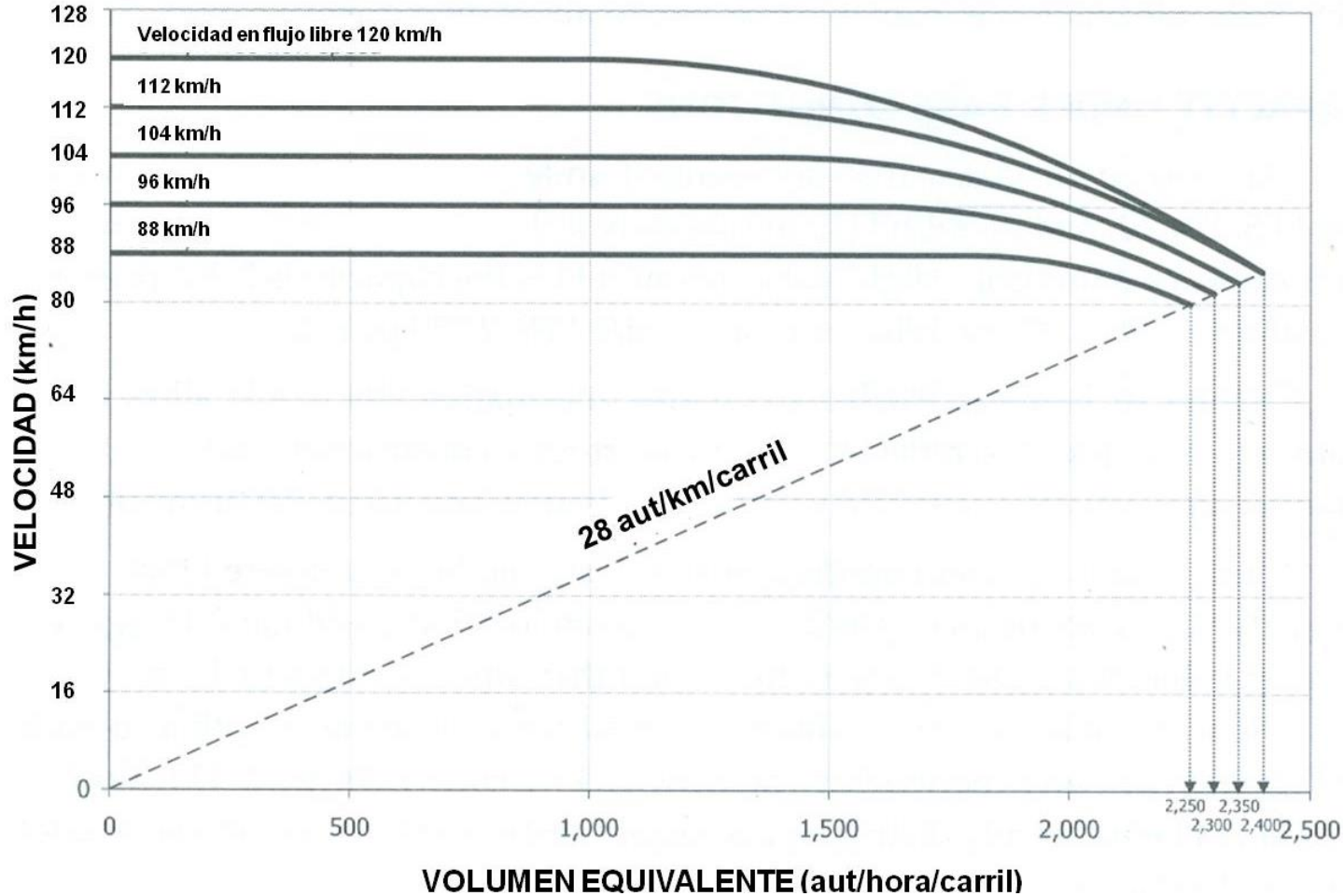


Curvas Volumen-Velocidad



- 2400 automóviles/hora/carril para velocidades en flujo libre de 112 y 120 Km/h
- 2350 automóviles/hora/carril para velocidad en flujo libre de 104 Km/h
- 2300 automóviles/hora/carril para velocidad en flujo libre de 96 Km/h
- 2250 automóviles/hora/carril para velocidad en flujo libre de 88 Km/h.

Curvas Volumen-Velocidad



- ✓ La velocidad en capacidad oscila entre 85 km/h a 80 km/h.
- ✓ Cuanto mayor es la velocidad en flujo libre, mayor es la caída de velocidad cuando el volumen se acerca a la capacidad. Para 120 km/h es de 35 km. Solo de 8 km/h para velocidad en flujo libre de 88 km/h.

Cálculo de la Velocidad Promedio

CUADRO 1: ECUACIONES DE LAS CURVAS VELOCIDAD VOLUMEN

Velocidad en flujo libre (km/h)	Punto de quiebre (aut/h/carril)	Velocidad (km/h)		
		<= al punto de quiebre	>punto de quiebre<=capacidad	Capacidad
120	1000	120	$120 - 0,000017712 \times (V_p - 1000)^2$	85
112	1200	112	$112 - 0,00001856 \times (V_p - 1200)^2$	85
104	1400	104	$104 - 0,000022688 \times (V_p - 1400)^2$	84
96	1600	96	$96 - 0,000029056 \times (V_p - 1600)^2$	82
88	1800	88	$88 - 0,000039504 \times (V_p - 1800)^2$	80

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Niveles de Servicio en Autopistas

La velocidad no es adecuada para definir niveles de servicio ya que en un amplio rango de volúmenes la misma es constante.

La calidad del servicio, la libertad para maniobrar y la proximidad con otros vehículos son igualmente importantes. Estas características están relacionadas directamente con la densidad.

TABLA 1: CRITERIOS PARA NIVELES DE SERVICIO

NIVEL DE SERVICIO	RANGO DE DENSIDAD (aut/km/carril)
A	0-7
B	> 7-11
C	>11-16
D	>16-22
E	>22-28
F	>28

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Descripción de Niveles de Servicio

NIVEL DE SERVICIO A: Operaciones en flujo libre. Proporciona al conductor un elevado de confort físico y psíquico. Pequeños incidentes no forman colas y rápidamente se vuelve al nivel.

NIVEL DE SERVICIO B: Condiciones razonables de flujo libre. Las maniobras se realizan con pocas restricciones y aún es elevado el grado de confort. Los pequeños incidentes se absorben rápidamente.

NIVEL DE SERVICIO C: Operaciones estables, pero cualquier aumento de volumen produce reducción del nivel de servicio. Restricciones en las maniobras, y el cambio de carril requiere un cuidado. Se absorben pequeñas interferencias pero con gran deterioro local.

NIVEL DE SERVICIO D: Limita con el flujo inestable. Pequeños aumentos de volumen deteriora el servicio. Limitación severa para maniobrar, se reduce drásticamente el nivel de confort físico y psíquico. Pequeños incidentes provocan colas.

NIVEL DE SERVICIO E: Límite con el nivel F es operación en capacidad. Muy inestable ya que no hay espacios libres. Los vehículos están separados con la mínima distancia para desarrollar un flujo estable. No se puede disipar ninguna interferencia.



Descripción de Niveles de Servicio

NIVEL DE SERVICIO F: Flujo interrumpido. Existe dentro de las colas. Estas interrupciones se producen por:

- a. Incidentes que provocan una reducción temporaria de la capacidad, de tal modo que el volumen que arriba es mayor que los vehículos que puede atravesar.
- b. Puntos reiterados de congestión, como áreas de convergencia, entrecruzamiento o salida, donde el número de vehículos que arriban es mayor que el número de vehículos que cruzan el lugar.
- c. Estudios futuros donde el volumen equivalente de la hora pico proyectado excede la capacidad estimada.

Determinación del Volumen Equivalente

Los criterios de nivel de servicio se expresan en volúmenes máximos equivalentes en automóviles por hora para el pico de 15 minutos.

Para convertir el volumen horario en vehículos equivalentes:

$$V_e = \frac{V_{vph}}{FHP \cdot N \cdot f_{vp} \cdot f_p}$$

Factor de Hora Pico

El FHP representa la variación del tránsito dentro de la hora. Las máximas relaciones de flujo se consideran en los volúmenes horarios con el uso del **factor de hora pico**.

FHP = Volumen horario / Máxima relación de flujo durante la hora

Si se utilizan períodos de quince minutos, se puede calcular como:

$$\text{FHP} = V_h / (4 \times V_{15})$$

Ajuste por vehículos pesados

- son de mayor dimensión que los automóviles y por lo tanto ocupan más espacio de camino que estos.
- la capacidad de operación de dichos vehículos (aceleración, deceleración, mantenimiento de la velocidad, etc.) es generalmente inferior a la de los automóviles.

Cuando se mezclan en el flujo de tránsito, esta diferencia de capacidades de rendimiento origina la formación de discontinuidades en la corriente vehicular que no pueden ser fácilmente cubiertas por maniobras de sobrepaso.

El segundo impacto es especialmente significativo en pendientes ascendentes prolongadas, en las que los camiones se pueden ver forzados a disminuir sensiblemente su velocidad produciendo en consecuencia discontinuidades en el flujo de tránsito.

Cálculo del factor f_{vp}

$$f_{vp} = 1/[1+P_c (E_c-1)]$$

El equivalente en automóviles se puede definir para dos casos:

a) Tramos largos uniformes: cuando no se presenta ninguna pendiente que produzca un impacto importante en la operación. Son tramos que no poseen pendientes mayores o iguales a 3% en longitudes superiores a 400 metros ó pendientes entre el 2% y 3% en longitudes superiores a 800 metros.

b) Pendientes específicas ascendentes: cualquier pendiente entre el 2% y el 3% con una longitud mayor a 800 metros o pendientes de 3% o más en longitudes superiores a 400 metros se analizan individualmente.

Tramos largos uniformes

El terreno de la infraestructura se clasifica en una de las siguientes categorías:

Terreno llano: la combinación del trazado horizontal y vertical permite a los vehículos pesados mantener velocidades similares a las velocidades de los automóviles; pueden presentarse pendientes cortas de no más de 2 %.

Terreno ondulado: la combinación del trazado horizontal y vertical provoca una reducción importante de la velocidad de los vehículos pesados, pero operar a marcha forzada durante períodos prolongados.

Automóviles equivalentes	Tipo de terreno	
	Llano	Ondulado
E_c	2,0	3,0

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Pendientes específicas ascendentes

TABLA 8: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 30% CAMIÓN SIMPLE 70% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E_c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	≥ 25
-2	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
0	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
2	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	3,76	2,96	2,78	2,65	2,48	2,38	2,22	2,14	2,09
	1000	4,47	3,33	3,08	2,91	2,68	2,54	2,34	2,23	2,17
	1400	4,80	3,50	3,22	3,03	2,77	2,61	2,39	2,28	2,21
	2000	5,00	3,60	3,30	3,09	2,83	2,66	2,42	2,30	2,23
	2400	5,04	3,62	3,32	3,11	2,84	2,67	2,43	2,31	2,23
2,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	4,11	3,14	2,93	2,78	2,58	2,46	2,28	2,19	2,13
	1000	5,04	3,62	3,32	3,11	2,84	2,67	2,43	2,31	2,23
	1400	5,48	3,85	3,51	3,27	2,96	2,77	2,50	2,36	2,28
	2000	5,73	3,98	3,61	3,36	3,03	2,83	2,54	2,40	2,31
	2400	5,80	4,02	3,64	3,38	3,05	2,84	2,55	2,41	2,32

Pendientes específicas ascendentes

TABLA 8: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 30% CAMIÓN SIMPLE 70% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E _c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
3,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	4,88	3,54	3,25	3,05	2,80	2,63	2,41	2,29	2,22
	1000	6,34	4,30	3,87	3,58	3,20	2,97	2,64	2,48	2,38
	1400	7,03	4,66	4,16	3,83	3,39	3,12	2,76	2,57	2,46
	2000	7,44	4,87	4,33	3,97	3,50	3,22	2,82	2,62	2,50
	2400	7,53	4,92	4,38	4,01	3,53	3,24	2,84	2,63	2,51
4,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	5,80	4,02	3,64	3,38	3,05	2,84	2,55	2,41	2,32
	1000	7,90	5,11	4,53	4,14	3,63	3,32	2,90	2,68	2,55
	1400	8,91	5,64	4,96	4,50	3,92	3,56	3,07	2,82	2,67
	1600	9,19	5,78	5,08	4,60	3,99	3,62	3,11	2,85	2,70
5,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	6,87	4,58	4,10	3,77	3,35	3,09	2,73	2,55	2,44
	1000	9,78	6,09	5,33	4,82	4,16	3,76	3,21	2,93	2,77
	1400	11,20	6,83	5,94	5,33	4,56	4,09	3,45	3,12	2,93
	1600	11,60	7,04	6,11	5,47	4,67	4,18	3,51	3,17	2,97
6	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	7,48	4,90	4,36	3,99	3,52	3,23	2,83	2,63	2,51
	1000	10,87	6,66	5,79	5,21	4,46	4,01	3,39	3,08	2,89
	1400	12,54	7,54	6,51	5,81	4,94	4,40	3,67	3,30	3,08
	1600	13,02	7,78	6,71	5,99	5,07	4,51	3,75	3,37	3,14

Se recomienda interpolar

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Pendientes específicas ascendentes

TABLA 9: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 50% CAMIÓN SIMPLE 50% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E_c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
-2	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
0	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
2	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	3,76	2,95	2,77	2,64	2,47	2,36	2,20	2,11	2,06
	1000	4,32	3,24	3,01	2,84	2,63	2,49	2,29	2,19	2,12
	1400	4,57	3,37	3,11	2,93	2,70	2,55	2,33	2,22	2,15
	2000	4,71	3,45	3,17	2,99	2,74	2,58	2,36	2,24	2,17
	2400	4,74	3,47	3,19	3,00	2,75	2,59	2,36	2,24	2,17
2,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	4,10	3,13	2,92	2,77	2,57	2,44	2,26	2,16	2,10
	1000	4,84	3,52	3,23	3,03	2,77	2,61	2,38	2,26	2,18
	1400	5,17	3,69	3,37	3,15	2,87	2,69	2,43	2,30	2,22
	2000	5,36	3,79	3,45	3,22	2,92	2,73	2,47	2,33	2,24
	2400	5,40	3,81	3,47	3,24	2,93	2,74	2,47	2,33	2,25

Pendientes específicas ascendentes

TABLA 9: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 50% CAMIÓN SIMPLE 50% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E_c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
3,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	4,89	3,54	3,25	3,05	2,79	2,62	2,39	2,26	2,19
	1000	6,05	4,15	3,75	3,47	3,11	2,89	2,58	2,42	2,32
	1400	6,58	4,43	3,97	3,66	3,26	3,01	2,67	2,49	2,39
	2000	6,88	4,58	4,10	3,77	3,35	3,09	2,72	2,53	2,42
	2400	6,95	4,62	4,13	3,80	3,37	3,10	2,73	2,54	2,43
4,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	5,83	4,03	3,65	3,39	3,05	2,84	2,55	2,39	2,30
	1000	7,53	4,92	4,38	4,01	3,53	3,24	2,83	2,62	2,50
	1400	8,32	5,34	4,72	4,29	3,75	3,42	2,97	2,73	2,59
	1600	8,53	5,45	4,81	4,37	3,81	3,47	3,00	2,76	2,62
5,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	6,97	4,63	4,14	3,81	3,38	3,11	2,74	2,55	2,43
	1000	9,37	5,89	5,16	4,68	4,05	3,67	3,14	2,88	2,72
	1400	10,49	6,48	5,65	5,09	4,37	3,93	3,34	3,03	2,85
	1600	10,80	6,64	5,78	5,20	4,46	4,01	3,39	3,08	2,89
6	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	7,64	4,98	4,43	4,05	3,56	3,26	2,85	2,64	2,51
	1000	10,45	6,45	5,63	5,07	4,36	3,92	3,33	3,03	2,85
	1400	11,78	7,16	6,20	5,56	4,74	4,24	3,56	3,22	3,01
	1600	12,15	7,35	6,36	5,69	4,85	4,33	3,62	3,27	3,05

Se recomienda interpolar

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Pendientes específicas ascendentes

TABLA 10: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 70% CAMIÓN SIMPLE 30% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E_c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
-2	200	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	600	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
0	200	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	600	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
2	200	2.67	2.32	2.23	2.17	2.08	2.03	1.94	1.89	1.86
	600	3.63	2.82	2.64	2.52	2.35	2.25	2.10	2.02	1.97
	1000	4.12	3.08	2.85	2.69	2.49	2.36	2.18	2.08	2.02
	1400	4.37	3.21	2.96	2.78	2.56	2.42	2.22	2.11	2.05
	2000	4.53	3.29	3.02	2.84	2.60	2.45	2.24	2.13	2.07
	2400	4.58	3.31	3.04	2.86	2.61	2.46	2.25	2.14	2.07
2,5	200	2.75	2.36	2.27	2.20	2.11	2.04	1.95	1.90	1.87
	600	4.01	3.02	2.80	2.65	2.46	2.33	2.16	2.06	2.01
	1000	4.66	3.35	3.08	2.88	2.64	2.48	2.26	2.15	2.08
	1400	4.99	3.52	3.21	3.00	2.73	2.56	2.32	2.19	2.12
	2000	5.20	3.64	3.30	3.08	2.79	2.60	2.35	2.22	2.14
	2400	5.26	3.67	3.33	3.10	2.80	2.62	2.36	2.23	2.15

Pendientes específicas ascendentes

TABLA 10: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 70% CAMIÓN SIMPLE 30% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E_c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
3,5	200	2.93	2.45	2.34	2.26	2.16	2.09	1.98	1.92	1.89
	600	4.86	3.46	3.16	2.96	2.69	2.53	2.30	2.18	2.10
	1000	5.88	3.99	3.59	3.32	2.98	2.76	2.46	2.31	2.22
	1400	6.40	4.26	3.81	3.51	3.12	2.88	2.55	2.38	2.28
	2000	6.74	4.43	3.96	3.63	3.21	2.96	2.60	2.42	2.32
	2400	6.83	4.48	3.99	3.66	3.24	2.98	2.62	2.44	2.33
4,5	200	3.13	2.56	2.43	2.34	2.21	2.13	2.01	1.95	1.91
	600	5.88	3.99	3.59	3.32	2.98	2.76	2.46	2.31	2.22
	1000	7.35	4.75	4.22	3.85	3.39	3.10	2.71	2.51	2.39
	1400	8.11	5.15	4.54	4.13	3.60	3.27	2.83	2.61	2.47
	1600	8.33	5.27	4.63	4.21	3.66	3.33	2.87	2.64	2.50
5,5	200	3.37	2.69	2.53	2.42	2.28	2.19	2.05	1.98	1.94
	600	7.09	4.62	4.11	3.76	3.31	3.04	2.66	2.47	2.36
	1000	9.13	5.68	4.97	4.49	3.88	3.51	3.00	2.74	2.59
	1400	10.21	6.24	5.43	4.88	4.18	3.76	3.18	2.89	2.71
	1600	10.52	6.41	5.57	5.00	4.27	3.83	3.24	2.93	2.75
6	200	3.51	2.76	2.59	2.47	2.32	2.22	2.08	2.00	1.95
	600	7.78	4.98	4.40	4.01	3.51	3.20	2.78	2.56	2.44
	1000	10.17	6.23	5.42	4.87	4.17	3.75	3.18	2.88	2.71
	1400	11.43	6.88	5.95	5.32	4.53	4.04	3.39	3.06	2.86
	1600	11.81	7.08	6.11	5.46	4.64	4.13	3.45	3.11	2.90

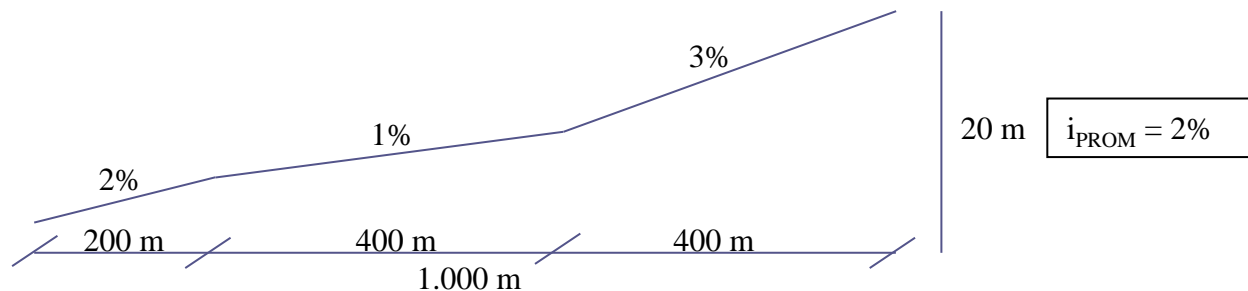
Se recomienda interpolar

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Pendientes compuestas

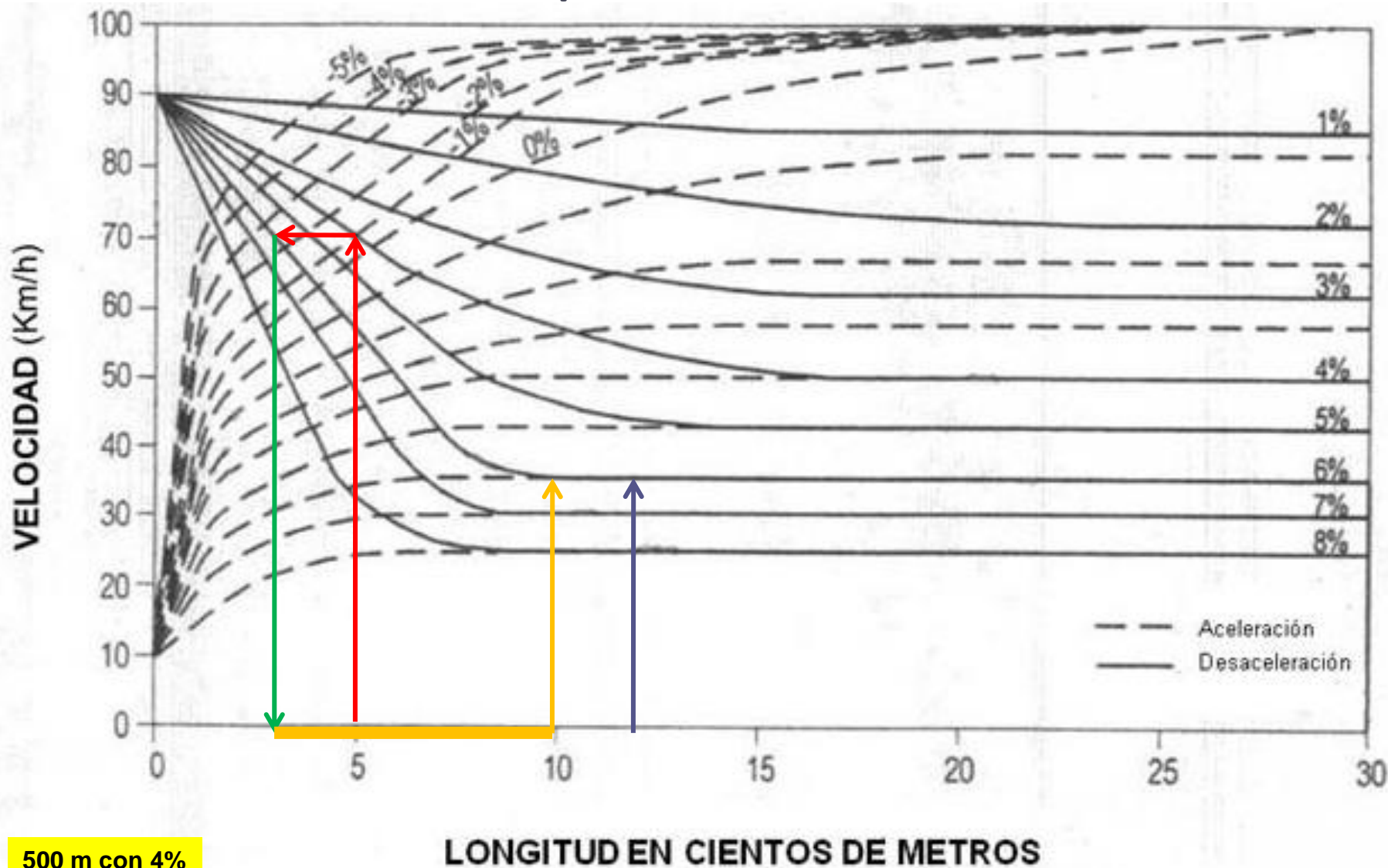
En el caso de pendientes consecutivas, se calcula una pendiente única

- a) se define la "pendiente promedio" hasta el punto crítico de interés que es la relación entre el desnivel total desde el comienzo de la pendiente compuesta hasta el punto en estudio y la longitud total. Este método es aplicable cuando cada una de las pendientes es inferior al 4 % o la longitud total del conjunto es igual o menor de 1200 m.



- b) Si las condiciones de las pendientes son más severas, se debe calcular la "pendiente equivalente", utilizando procedimiento especial.

Pendientes compuestas



500 m con 4%
700 m con 6%

LONGITUD EN CIENTOS DE METROS

Ajuste por población de conductores

Las condiciones ideales definidas para las relaciones típicas velocidad-flujo-densidad asumen una población de conductores compuesta principalmente por usuarios diarios. Los flujos de tránsito compuestos fundamentalmente por conductores ocasionales, operan con menos eficiencia. Para dichas corrientes vehiculares se reduce la capacidad entre el 10 y el 15 %.

El factor f_p , refleja este efecto. Los valores oscilan entre 1,00 y 0,85. En general se utiliza 1,00, a menos que exista evidencia de tránsito recreacional.

TABLA 6: FACTOR POR IMPACTO DE LA POBLACIÓN DE CONDUCTORES	
Nivel de conocimiento	Factor f_p
Todos conductores habituales, regulares diarios	1,000
La mayoría conductores habituales	0,968
Mezcla equilibrada entre conductores habituales y no habituales	0,939
La mayoría conductores no habituales	0,898
Todos o una enorme proporción de conductores no habituales	0,852
<i>Fuente: Highway Capacity Manual 2016</i>	

Determinación de la Velocidad de Flujo Libre

Dos metodologías:

Medir la velocidad en campaña: La velocidad se mide en una ubicación representativa dentro del tramo. Se estudia con volúmenes bajos (hasta 1000 automóviles/h/carril). La velocidad promedio de todos los automóviles se usa como velocidad en flujo libre. Si se considera automóviles y vehículos pesados, el resultado sirve para terreno llano pero no deben usarse en terrenos ondulados o montañosos.

Estimarla con la fórmula:

$$v_{fl} = 120 - f_{ac} - f_{ol} - 5,18 \times (DR \times 1,6)^{0,84}$$

f_{ac} = ajuste por ancho de carril

f_{ol} = ajuste por obstrucción lateral en la banquina derecha

DR = densidad de ramas (ramas/km)

Ancho de carril

Si los anchos de carril son menores de 3,6 m, los conductores se ven forzados a circular a distancias laterales de los otros vehículos menores y tienden a compensar manteniéndose más alejados de los vehículos en el mismo carril. En este caso el volumen pasante decrece.

TABLA 7: AJUSTE POR ANCHO PROMEDIO DE CARRIL (KM/H)

ANCHO PROMEDIO DE CARRIL (m)	REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD EN FLUJO LIBRE f_{ac} (km/h)
$\geq 3,6$	0,0
$\geq 3,3-3,6$	3,1
$\geq 3,0-3,3$	10,6

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Distancia a las obstrucciones laterales

El efecto es similar al del ancho de carril, cuando existen objetos a los costados o en el separador central, los conductores tienden a alejarse dejando mayor espacio que en condiciones ideales. Los conductores se acercan lateralmente y compensan dejando mayor distancia entre vehículos del mismo carril.

Los conductores en el carril contiguo al separador central no perciben la obstrucción si la misma está a más de 60 cm., mientras que los que circulan por el carril derecho, se ven afectados a distancias menores a 1,80 m.

TABLA 8: AJUSTE POR OBSTRUCCIONES EN LADO DERECHO (KM/H)

OBSTRUCCIÓN LATERAL EN BANQUINA DERECHA (m)	REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD EN FLUJO LIBRE f_{dl} (km/h)			
	CARRILES EN UN SENTIDO			
	2	3	4	≥ 5
≥ 1.8	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	1,0	0,7	0,3	0,2
1,2	1,9	1,3	0,7	0,3
0,9	2,9	1,9	1,0	0,5
0,6	3,9	2,6	1,3	0,6
0,3	4,8	3,2	1,6	0,8
0,0	5,8	3,9	1,9	1,0

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Densidad de Ramas

Los ingresos y entrecruzamientos asociados con los intercambiadores afectan la velocidad. Las autopistas con intercambiadores próximos (zonas densamente pobladas), operan a velocidades inferiores.

La ecuación incluye un término que tiene en cuenta el impacto de las ramas sobre la velocidad en flujo libre. La densidad total de ramas se define como el número de ramas (tanto de ingreso como de egreso en la dirección estudiada), ubicadas 5 km corriente arriba y 5 km corriente abajo del punto medio del tramo en estudio, dividido por 10 km.

Cálculo de la Densidad

Se calcula la velocidad promedio de circulación

Utilizando las fórmulas de las curvas.

Estimándola gráficamente mediante la curva Volumen-Velocidad.

- ✓ Encontrar sobre el eje horizontal el valor correspondiente al volumen equivalente (V_e) en automóviles por hora y por carril.
- ✓ Leer en la curva correspondiente a la velocidad en flujo libre seleccionada, la velocidad correspondiente a automóviles en ese punto.

Una vez determinada la velocidad de circulación, se calcula la densidad

$$D = V_e/v$$

Procedimiento de aplicación

La metodología se utiliza en en alguna de las cuatro aplicaciones siguientes:

- 1) Análisis operacional:** El análisis se concentra en la determinación del nivel de servicio, pero se puede estimar la velocidad de marcha y densidad. Requiere el tránsito detallado, incluyendo volúmenes, características de pico, composición del tránsito y trazado horizontal y vertical.
- 2) Diseño:** se utiliza un volumen de la demanda estimado en conjunción con normas de diseño conocidas para las características geométricas y el nivel de servicio deseado, para calcular el número de carriles requeridos.
- 3) Planeamiento:** No existen detalles sobre pendientes específicas y otras características geométricas. Las predicciones de tránsito no son exactas. Sirve para dar una idea de los requerimientos geométricos.
- 4) Volúmenes equivalentes y de servicio:** En este análisis se estima el volumen equivalente, el volumen de servicio o el volumen diario (o los tres), para cada nivel de servicio en una infraestructura existente o futura. En este caso se deben especificar todas las condiciones de geometría y tránsito.