

# ANÁLISIS DE VELOCIDAD DEL TRANSPORTE PÚBLICO EN CALLES URBANAS

**Ingenieros Jorge Galarraga, Marcelo Herz y Violeta Depiante**

*Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Transporte – Instituto Superior de Ingeniería del Transporte – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.*

[jorgala@efn.uncor.edu](mailto:jorgala@efn.uncor.edu) , [mherz@arnet.com.ar](mailto:mherz@arnet.com.ar) , [vdepiante@yahoo.com](mailto:vdepiante@yahoo.com)

## RESUMEN

La progresiva urbanización y motorización de nuestra sociedad ha creado en nuestras ciudades un creciente problema de congestión y polución. El transporte público urbano constituye un eficiente modo de movilizar muchas personas al mismo tiempo, por su menor uso de la capacidad vial, menor uso de energía y menor generación de contaminantes por pasajero transportado. Sin embargo, el transporte público muestra una persistente tendencia a disminuir su participación en los viajes urbanos.

Considerando la estratégica prioridad que tiene revertir la tendencia de disminución del transporte público en las ciudades argentinas, y la contribución que pueda provenir de mejorar las velocidades comerciales en zonas y horarios de congestión de calles urbanas, este Grupo de Trabajo, sobre la base de los resultados de anteriores investigaciones de tránsito en calles urbanas está investigando metodologías de análisis de capacidad y velocidad del transporte público en calles urbanas, mediante un Proyecto de Investigación apoyado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba.

El transporte público en todas sus formas produce un impacto en el tránsito y a su vez éste afecta las medidas de performance del transporte público, especialmente la velocidad. El propósito es generar y evaluar medidas de priorización en el tránsito para el transporte público en áreas centrales y arterias que permitan mejorar la velocidad de recorrido, con un favorable impacto para los pasajeros y para los operadores respecto al tamaño de las flotas.

El presente trabajo desarrolla los aspectos relativos al análisis de velocidad de ómnibus de transporte público considerando datos disponibles de velocidades de recorrido y relevamientos específicos de velocidades de operación efectuados en arterias de penetración y en el centro de la ciudad de Córdoba, el análisis de las metodologías de capacidad y nivel de servicio de transporte público del Manual de Capacidad 2000 referidas a velocidad y tiempos de recorrido, basado en los criterios publicados en Transit Capacity and Quality of Service Manual (Transit Cooperative Research Program Document No. 6. TRB.), y el análisis de las variables de modelación de líneas de ómnibus en el tránsito utilizando modelos microscópicos de tránsito, en este caso el NETSIM. (Traffic Software Integrated System –TSIS).

## 1.- Velocidad del transporte público

Las calles urbanas, que compiten con otras demandas de uso del suelo, deben permitir viabilizar un transporte eficiente en situaciones de limitada capacidad, y si bien el transporte masivo es una buena solución, hay una persistente tendencia a disminuir su participación en los viajes urbanos frente al transporte individual.

Con el propósito de identificar acciones que ayuden a revertir la tendencia de disminución del transporte público en las ciudades argentinas, se están investigando aplicaciones locales de metodologías de análisis de capacidad y velocidad de ómnibus en calles urbanas, caracterizando el caso de la ciudad de Córdoba (1.300.000 habitantes). La velocidad de operación o velocidad de viaje del ómnibus en calles urbanas está sujeta a diversas demoras, que en el caso de ómnibus significa mayores tiempos de viaje para los usuarios y mayores costos para los operadores. Los componentes del tiempo de viaje y las variables explicativas pueden describirse como:

- tiempo en movimiento con velocidad libre, que depende del límite regulado de velocidad ( en Argentina 60 km/h para avenidas, 40 km/h para calles, salvo distinta señalización in situ)
- demora en paradas, compuesta por la deceleración y aceleración, y por el tiempo de permanencia. La primera es función del número de paradas por kilómetro y la segunda es función del tiempo de ascenso y descenso de pasajeros, desde la apertura hasta el cierre de puertas.
- demoras por el tránsito, compuesta por la congestión general de la vía, demoras por semáforos y por giros a la derecha que obstruyen el carril utilizado por los ómnibus.

Todos los componentes antes mencionados se reflejan en la velocidad de viaje del ómnibus calculada con la expresión :  $V_v = L / t$  ,dónde  $V_v$  : velocidad de viaje del ómnibus (km/h), L : Longitud de la vuelta (km) y t : tiempo de la vuelta (horas)

### **Impactos de la velocidad en los operadores**

La cantidad de ómnibus requeridos para cumplir un recorrido L (km) en una línea o ruta, con un intervalo equivalente a una frecuencia F (Nº/h) es inversamente proporcional a la velocidad de viaje

$$N = \frac{F * L}{V_v}$$

dónde N : número de ómnibus, F: frecuencia de ómnibus por hora de esa línea en una sección (  $F = 60 / \text{Intervalo (minutos)}$ ), L y  $V_v$  : antes definidos.

Existen dos componentes que modifican este cálculo.

a) el descanso de punta de línea para el chofer, que es de 10 a 15 minutos cada 120 minutos de vuelta aproximadamente, lo que representa alrededor de un 10% de disminución de la velocidad comercial.

b) la flota de reserva para contingencias, estimada en un 5% en flotas de 100 a 120 ómnibus, que puede aumentar al 7-10 % en flotas de 30 ómnibus según requerimientos del concedente del servicio.

A nivel de empresas existe un margen para disminuir la flota necesaria coordinando cambios de chofer en las puntas de línea y utilizando sistemas de gestión de mantenimiento que permitan disminuir la reserva, lo cuál debería explorarse. No obstante, aún alcanzando un óptimo en estos aspectos, la velocidad es la única variable que puede permitir disminuir costos sin afectar la prestación del servicio en el espacio (L) y en el tiempo (F).

### **Impactos de la velocidad en los usuarios**

Un viaje típico en ómnibus urbano tiene los siguientes componentes:

- tiempo de acceso a la parada ( caminando)
- tiempo de espera al ómnibus
- tiempo de viaje en el ómnibus

- tiempo de acceso al destino (caminando)

Las variables del servicio afectan todos estos tiempos. El tiempo de acceso a la parada y al destino puede modificarse con la ruta y con la separación entre paradas, siendo mínimo para líneas que paran en todas las cuadras. El tiempo de espera es función directa del intervalo, siendo en promedio la mitad de dicho valor entre dos ómnibus de la línea, y el tiempo de viaje es función directa de la velocidad.

Estudios de percepción de calidad de servicios de transporte público (ISIT 2005) muestran que los usuarios se quejan 1º por la espera, 2º por las caminatas y 3º por el tiempo de viaje en el ómnibus, lo cuál daría más relevancia a las mejoras de rutas y frecuencias que a la velocidad. Sin embargo, visto el impacto de la velocidad en los operadores, la disminución de demoras del ómnibus podría viabilizar aumentos de frecuencias con costo de oportunidad cero del capital (ómnibus) y mano de obra (chofer), contabilizando sólo los costos marginales (combustible, etc).

La disminución del tiempo de viaje en el ómnibus podría entonces producir un efecto sinérgico para disminuir el tiempo de espera, lo cuál sería un atractivo para mitigar la persistente pérdida de participación del transporte público y el persistente aumento de congestión en el centro y arterias por el crecimiento de viajes en vehículos individuales.

## 2. Velocidad de recorrido de ómnibus urbanos en ciudades argentinas

El desarrollo del transporte público se relaciona directamente con la cantidad de habitantes, siendo mínimo o nulo en ciudades con menos de 30.000 habitantes y muy importante en ciudades con más de 300.000 habitantes. El tamaño de la ciudad tiene gran influencia en el grado de desarrollo del transporte público respecto al transporte individual (Galarraga 2001, a).

Se consideran a continuación dos casos con más de 1.000.000 de habitantes (Córdoba y Rosario) y otros dos casos con menos de 300.000 habitantes (Río Cuarto y San Fernando). También se incluyen como referencia datos de ómnibus de Montevideo, Uruguay (1.400.000 habitantes)

En Córdoba las principales líneas son radiales, con recorridos de vuelta completa del orden de 40 km y velocidades del orden de 19 km/h. El Cuadro 1 muestra las velocidades de las líneas radiales con mayor frecuencia, dos líneas de trolebuses y una de circunvalación, como las más representativas, sin incluir la incidencia de descansos en punta de línea.

Línea	Intervalo (min)	L (km)	T vuelta (min)	V (km/h)
C Azul	8	39.7	120	19.8
C Rojo	8	39.9	122	19.6
C Celeste	10	39.1	115	20.4
C Amarillo	11	39.2	118	19.9
C Naranja	11	55.9	153	21.9
Trolebús B	7	17.6	66	16.0
Trolebús C	7	24.5	90	16.3
Anillo 600	17	42.3	115	22.1

Cuadro 1: Córdoba

Existen 3 líneas de trolebuses que cruzan el área central con recorridos del orden de 20 km, lo cuál les da mayor proporción de viaje en el área central y resulta en una velocidad del orden de 16 km/h. Por otra parte, la línea de circunvalación que no pasa por el centro muestra la mayor velocidad a pesar de recorrer muchas calles barriales.

En Rosario también las principales líneas son radiales. El sistema reconoce líneas interdistritales (al menos dos distritos y el área central), líneas distritales (un distrito con el área central), líneas de ronda, de enlace y barriales. Las líneas interdistritales tienen recorridos de vuelta completa del orden de 30 a 45 km y velocidades medias de 19 km/h, en tanto las líneas distritales tienen velocidades del mismo orden en recorridos del orden de 20 km de longitud, lo cuál es consistente con su proporción de recorridos por el centro, ya que estas rutas ingresan al área central pero regresan al distrito de origen sin cruzarla. El cuadro 2 muestra las velocidades de algunas de las líneas con mayor frecuencia

Línea	Intervalo (min)	L (km)	T vuelta (min)	V (km/h)
102 N	10	33.3	100	20.0
107	7.5	47.6	147	19.4
143	7.5	43.4	132	19.7
113	8	30.3	94	19.3
148	7.5	30.0	90	20.0
112	7.5	43.6	132	19.8
126	8	40.0	126	19.0
116	7.5	45.1	140	19.3
129 Distrital	7	20.8	65	19.2
125 Distrital	7	21.8	72	18.0

Cuadro 2: Rosario

Río Cuarto, ciudad de 150000 habitantes tiene más de 15 rutas de ómnibus pero con frecuencias del orden de 3 o menos ómnibus por hora. Las principales líneas en términos de frecuencias se muestran en el Cuadro 3, observándose que los recorridos de vuelta completa son del orden de 25 km y las velocidades medias del orden de 20 km/h, excepto la línea 9 que es suburbana.

Línea	Intervalo (min)	L (km)	T vuelta (min)	V (km/h)
1 Rojo/verde	24	23.4	71	19.8
3	30	31.7	90	21.1
4	23	24.0	80	18.1
5	20	29.3	80	21.9
9	30	54.8	120	27.4

Cuadro 3: Río Cuarto

San Fernando, ciudad con similar cantidad de habitantes que Río Cuarto, a diferencia de ésta última que está rodeada de área rural, se ubica en el Gran Buenos Aires, entre los partidos del Tigre y San Isidro, con servicios de trenes y ómnibus expresos a Capital Federal y otros partidos del área metropolitana. Por San Fernando circulan más de 10 líneas con numerosos ramales, pero los viajes locales son principalmente servidos por las líneas 710 y 371. El Cuadro 4 muestra que los recorridos de vuelta completa

Línea	Intervalo (min)	L (km)	T vuelta (min)	V (km/h)
C Azul	8	13.2	43	18.2
C Rojo	12	29.2	82	21.3
C Celeste	8	38.7	110	21.2
C Amar	8	32.4	87	22.4

Cuadro 4: San Fernando

La Figura 1 muestra un resumen de las velocidades medias de viaje de líneas características de Córdoba, Rosario, Río Cuarto y San Fernando con relación a la longitud de la ruta. También muestra como referencia datos de las líneas 185 y 105 de Montevideo.

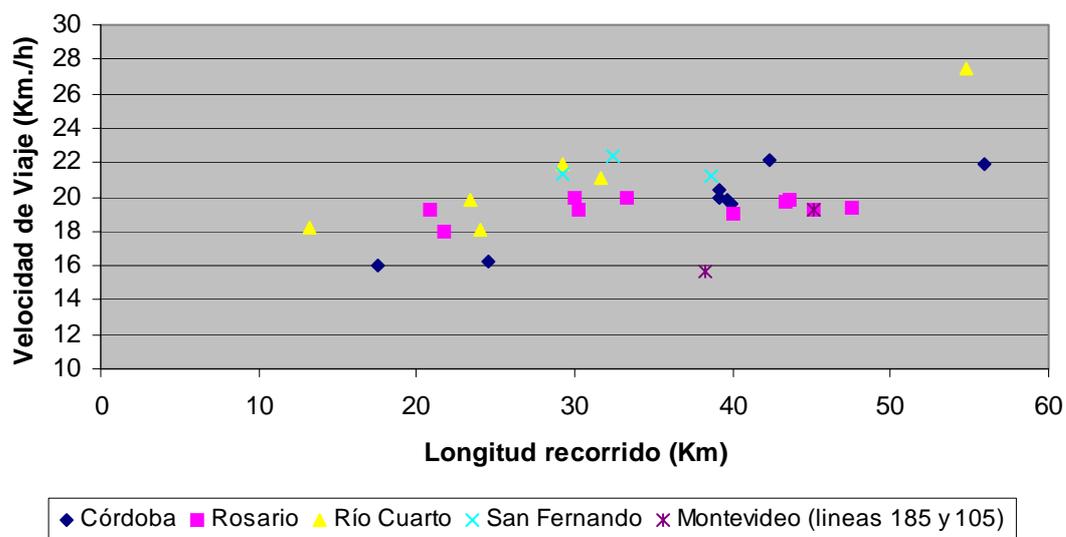


Figura 1: Velocidad de viaje en diferentes ciudades

Típicamente las velocidades de viaje se encuentran alrededor de los 20 Km/h, independientemente del tamaño de la ciudad. Se considera que si bien en las ciudades más chicas, por su tamaño, el recorrido en el centro es menor, también el recorrido total se reduce, manteniendo las participaciones relativas. En los extremos se identifican los trolebuses en Córdoba con mayor participación del área central que ocasiona velocidades menores (16 Km/h) y la línea suburbana de Río Cuarto.

### 3. Metodología del Manual de Capacidad 2000

El Manual de Capacidad del TRB incluyó por primera vez el transporte público en la versión de 1985, definiendo los niveles de servicio para operación en términos de pasajeros/ómnibus y de ómnibus/hora. Este criterio se mantuvo en la actualización de 1994, en tanto se obtenían más conocimientos como resultado de investigaciones sobre el comportamiento de ómnibus en servicios por calles y autopistas. La observación de variables del impacto del tránsito general sobre los servicios y de variables de operación de los ómnibus y de las paradas sobre el tránsito general, dejó en evidencia la conveniencia de introducir un criterio adicional para el nivel de servicio del transporte público: la velocidad de viaje

Los resultados referidos a velocidad y tiempos de recorrido, se basan principalmente en las investigaciones sobre análisis operacional de carriles de ómnibus en arterias (ST JACQUES, 1997) El procedimiento básico propuesto para estimar capacidad de carriles de ómnibus y velocidad se plantea en tres pasos:

#### 1. Identificar parámetros básicos

- Tipo de carril de ómnibus
- Patrón de paradas
- Número de dársenas o áreas de carga en cada parada
- Tiempo de permanencia medio (en parada crítica)
- Volumen de ómnibus y de tránsito (en hora pico)
- Semáforos (ciclo, verde efectivo, desfases)

#### 2. Estimar capacidad de carriles de ómnibus

- Capacidad básica de paradas. Dársenas efectivas

- Factores de ajuste: patrón de paradas, disponibilidad de carril adyacente, giros a la derecha
- Estimación de relación  $V_b/C_b$  para carril de ómnibus y NdS

### 3. Estimar velocidad de viaje de ómnibus

- Velocidad básica y tiempos de recorrido base
- Factores de ajuste: patrón de paradas, disponibilidad de carril adyacente, interferencias entre ómnibus
- Estimación de velocidad de viaje y NdS

El Cuadro 5 muestra la relación propuesta de nivel de servicio asociado con la velocidad de ómnibus y comparada con el criterio del Manual de Capacidad para arterias clase 3

Nivel de Servicio	Arteria Clase III 40 a 50 km/h velocidad libre		Calles del área central 4 paradas/km		Arterias fuera del centro 3 a 4 paradas/km	
	min/km	km/h	min/km	km/h	min/km	km/h
A	$\leq 1.5$	$\geq 40$	$\leq 3.8$	$\geq 16$	$\leq 2.2$	$\geq 26.7$
B	$\leq 1.9$	$\geq 30.4$	$\leq 5.6$	$\geq 11$	$\leq 2.9$	$\geq 20.3$
C	$\leq 2.9$	$\geq 20.8$	$\leq 7.5$	$\geq 8.0$	$\leq 4.3$	$\geq 13.9$
D	$\leq 4.2$	$\geq 14.4$	$\leq 9.4$	$\geq 6.4$	$\leq 6.8$	$\geq 9.6$
E	$\leq 5.4$	$\geq 11.2$	$\leq 11.2$	$\geq 5.3$	$\leq 7.8$	$\geq 7.5$
F	$> 5.4$	$< 11.2$	$> 11.2$	$< 5.3$	$> 12.9$	$< 7.5$

Cuadro 5: Velocidad y Nivel de Servicio. Fuente: adaptación de ST JACQUES, 1997

Las metodologías mejoradas para estimar capacidad y nivel de servicio de transporte público, incluyendo estimaciones de velocidad de viaje, fueron incorporadas en el documento *Capacidad y Nivel de servicio del transporte público (Transit Capacity and Quality of Service Manual ,1999)*. y sobre esa base se desarrolla el capítulo 27 correspondiente al transporte público del Manual de Capacidad 2000. (*Highway Capacity Manual ,2000*) . El Manual de Capacidad 2000 no incluye un criterio como el planteado en el cuadro anterior, pero adopta el procedimiento y los resultados experimentales para estimar la velocidad de viaje de ómnibus con los parámetros básicos siguientes

**Carriles:** Además de carriles comunes de tránsito mixto, se caracterizan carriles exclusivos de ómnibus tipo 1 (un carril exclusivo de ómnibus sin sobrepaso en igual dirección o en contraflujo ), tipo 2 (un carril exclusivo con sobrepaso tipo salto de rana alrededor de ómnibus detenidos en carril adyacente de tránsito mixto) y tipo 3 (dos carriles exclusivos con giros a la derecha prohibidos para los no ómnibus). En Argentina varias ciudades grandes tienen en el área central dos o más carriles selectivos en avenidas y tramos de calles enteras para ómnibus, pero como se permiten taxis y otros vehículos autorizados, funcionan como de tránsito mixto restringido. Este caso sería uno intermedio entre el carril único exclusivo con uso del carril adyacente de tránsito mixto (tipo 2) y dos carriles exclusivos, ya que en tramos de avenidas con carriles selectivos, se prohíbe el giro a la derecha del tránsito general , que interferiría con el carril de ómnibus.

**Patrón de paradas:** En el esquema de operación básica, todas las líneas tienen programado detenerse en todas las paradas de un tramo, por lo que la capacidad del carril queda limitada a la capacidad de la parada crítica. Pero si en paradas contiguas las diversas líneas de ómnibus programan detenerse alternadamente, se generan esquemas de paradas divididas por líneas (skip stop operation) con lo que la parada crítica disminuye su demanda y aumenta la

capacidad del carril. Cuando aproximadamente la mitad de las líneas paran en una cuadra y la otra mitad en la siguiente, se conforma un patrón de paradas dividido por líneas cada dos cuadras, y en caso de dividirse en tercios conforman un patrón de paradas dividido por líneas cada tres cuadras. En ciudades argentinas, es usual utilizar en el centro estos patrones de salteo que aumentan significativamente la capacidad de carriles de ómnibus y la velocidad de viaje, siempre que el carril adyacente esté disponible para sobrepasar las paradas no programadas.

Número de dársenas por parada: El Manual de Capacidad diferencia las áreas de carga o dársenas, de la parada, la cuál puede tener una o más dársenas para subir y bajar pasajeros. Si la parada fuera una estación de ómnibus es fácil interpretar la diferencia entre parada y dársenas, pero en las calles de ciudades argentinas acostumbramos a identificar la parada del ómnibus con el poste indicativo, o con el resguardo techado en las paradas más importantes, y en el centro suele haber dos o más postes por cuadra. Por otra parte el Manual de Capacidad diferencia la ubicación de las paradas antes de la intersección, después de la intersección y a mitad de cuadra, explicitando la influencia de la intersección en el funcionamiento de la parada.

Tiempo de permanencia: Es el tiempo de servicio en la parada entre la apertura y cierre de puertas para la subida y/o bajada de pasajeros, el cuál depende de la cantidad y del tipo de puertas, sistema de pago, etc. El parámetro debe reflejar valores medios por parada servida en hora pico.

Otras variables a caracterizar en la hora pico para estimar la capacidad de carriles de ómnibus y velocidad de viaje son los volúmenes de ómnibus (bus/h), los volúmenes de tránsito general (veh/h), y los controles de semáforos en términos de ciclo, verde efectivo, desfases, etc.

### Capacidad de carriles de ómnibus

La metodología considera primero la capacidad de ómnibus/h que puede procesar la parada de mayor demanda (crítica), en función del número y capacidad de sus dársenas. Luego considera el efecto de giros a la derecha del tránsito que puede perturbar a la salida de la parada crítica y finalmente el efecto de la operación con paradas divididas por líneas. Cada línea encuentra su capacidad en ómnibus/h limitada por su parada crítica, pero si operan con paradas divididas por línea, estas capacidades se suman para cada grupo de líneas que comparten el carril, afectadas de un factor por disponibilidad de carril de sobrepaso.

Capacidad básica de paradas: El máximo número ómnibus/h por dársena se calcula con la expresión

$$B_{bb} = \frac{3600 \left( \frac{g}{C} \right)}{t_c + \left( \frac{g}{C} \right) t_d + Z_a C_v t_d}$$

dónde  
 $B_{bb}$  : máximo número de ómnibus por hora por dársena  
 $g/C$  : verde efectivo por ciclo ( 1 si no hay semáforos)  
 $t_c$ : tiempo de despeje de la dársena (seg)  
 $t_d$ : tiempo de permanencia en la dársena

$Z_a C_v t_d$  : tiempo de demora por cola de espera para ingresar a la dársena, depende del coeficiente de variación de  $t_d$  ( $C_v$ ) y del nivel de probabilidad de formación de cola tolerado según la distribución normal ( $Z_a$ ). Si se admite formación de colas para ingresar a dársena ( $Z_a = 0$ ), ésta opera con máxima capacidad con un 50% de probabilidad de ómnibus en espera, pero si se pretende limitar al 15 % la probabilidad ( $Z = 1,04$ ), o al 5% la probabilidad ( $Z_a = 1,64$ ), la capacidad de referencia se reduce.

El máximo número de ómnibus/h por carril para operación básica (todas las líneas utilizan la parada crítica) se calcula con la expresión :  $B = B_{bb} N_e b_{fr}$

dónde : B: máximo número de ómnibus por hora por carril (operación básica)

$B_{bb}$ : máximo número de ómnibus/h por dársena en la parada crítica (bus/h)

$N_e$ : número de dársenas efectivas en la parada crítica

$f_r$ : factor de ajuste por giros a la derecha del tránsito en la parada crítica

El número de dársenas efectivas para dársenas múltiples distribuidas linealmente resulta algo menor al número físico de áreas de carga en la parada, según datos de campo incluidos en el Manual que se muestran en el Cuadro 6

Nº de Dársenas	1	2	3	4	5
en carril $N_e$	1.00	1.85	2.45	2.65	2.70
fuera de carril $N_e$	1.00	1.85	2.60	3.25	3.75

Cuadro 6 Número de dársenas efectivas  $N_e$ . Fuente: adaptado de E 27-12 del Manual de Capacidad 2000

El factor de ajuste por giros a la derecha depende de la relación  $V_r/C_r$  que es el ratio del volumen de giros a la derecha en la intersección siguiente a la parada crítica y la capacidad de giros a la derecha, y también depende del tipo de carril y de la posición de la parada en la cuadra.

El máximo número de ómnibus/h por carril para operación con paradas divididas por línea se calcula la expresión:  $B = f_k (B_1 + B_2 + \dots + B_n)$

dónde B: máximo número de ómnibus por hora por carril (operación con paradas divididas por línea);  $f_k$ : factor de ajuste de capacidad para operación con paradas divididas por línea;  $B_1, B_2, \dots, B_n$  máximo número de ómnibus/h de cada grupo de líneas operando en su parada crítica según esquema de operación con paradas divididas (bus/h)

El factor de ajuste de capacidad  $f_k$ , menor a 1, refleja el efecto de arribos no coordinados a las paradas y el efecto del tránsito en el carril adyacente, que impiden aprovechar el 100% de la capacidad adicional por distribuir las paradas en grupos de líneas, y sus valores típicos según datos de campo incluidos en el Manual se muestran en el Cuadro 7

Nº de paradas alternadas	arribos aleatorios	Arribos típicos	arribos en pelotón
2 carril adyacente libre ( $v/c=0$ )	0.75	0.88	1.00
2 carril adyacente no disponible ( $v/c=1$ )	0.55	0.58	0.60
3 carril adyacente libre	0.67	0.83	1.00

Cuadro 7 Factor de ajuste de capacidad  $f_k$ . Fuente: adaptado de E 27-16 del Manual de Capacidad 2000

## Velocidad de viaje

Tanto las investigaciones sobre operación de ómnibus en arterias como el Manual de Capacidad destacan que el mejor método para estimar la velocidad de viaje de ómnibus es medirlo directamente a lo largo de la ruta, o bien para casos en que todavía no se opera la línea, manejar haciendo un número medio de paradas con simulación de tiempos de permanencia, en hora pico y en hora no pico.

La otra opción es utilizar el método analítico que calcula la velocidad de viaje con la expresión:

$$S_t = \left( \frac{60}{t_{r,0} + t_{r,1}} \right) f_s f_b$$

dónde:  $S_t$ : Velocidad de viaje del ómnibus (speed of travel) (km/h)

$S_0$ : Velocidad básica (km/h) =  $60/(t_{r,0} + t_{r,1})$

$t_{r,0}$  : tiempo base de recorrido, refleja la velocidad a la que viajarían sin semáforos ni demoras por el tránsito (min/km)

$t_{r,1}$  : tiempo de demoras por semáforos y demoras por el tránsito (min/km)

$f_s$ : Factor de ajuste de velocidad por operación con paradas divididas por líneas

$f_b$ : Factor de ajuste de velocidad por interferencia entre ómnibus

Los Cuadros 8 y 9 muestran los valores propuestos en el Manual de Capacidad para  $t_{r0}$  y  $t_{r1}$  respectivamente.

Permanencia (seg/parada)	Número de paradas/km					
	1	2	3	4	5	6
10	1,39	1,82	2,29	2,83	3,46	4,18
20	1,55	2,15	2,79	3,49	4,29	5,19
30	1,72	2,49	3,29	4,16	5,12	6,18
40	1,89	2,82	3,78	4,82	5,96	7,18
50	2,06	3,15	4,28	5,49	6,80	8,18
60	2,22	3,48	4,77	6,15	7,63	9,18

Cuadro 8 Tiempo base de recorrido  $t_{r0}$  ( en minutos/km). Fuente: HCM 2000 Cuadro 27-18

Condición	carril exclusivo (1)	carril exclusivo (2)	carriles comunes con tránsito mixto
Semáforos. prog. para ómnibus	0,4-0,8		
Típica en el centro	0,7-1,2	1,5-1,8	1,8
semáforos más frecuentes que paradas	0,9-1,8	1,8-2,1	2,1-2,4
Típica fuera del centro	0,3-0,6		0,4-0,9

Cuadro 9 Tiempo de demoras por tránsito  $t_{r1}$  (en minutos/km). Fuente: HCM 2000 Cuadro 27-19

(1) sin y con giros a la derecha permitidos

(2) bloqueado por tránsito

El aumento de velocidad respecto al esquema de todas las líneas deteniéndose en todas las paradas se refleja en el  $t_{r0}$ , pues disminuye el número de paradas por kilómetro. Sin embargo si un ómnibus que en una parada no programada queda detenido detrás de otro por no poder sobrepasarlo se genera un impacto desfavorable en la velocidad. El Factor de ajuste de velocidad por operación con paradas divididas por línea " $f_s$ " refleja este impacto, que según observaciones de campo (ST JAQUES, 1997) aumenta con el cuadrado del grado de saturación del carril adyacente y con el grado de saturación del carril de ómnibus.

$$f_s = 1 - \left( \frac{L_1}{L_2} \right) * \left( \frac{V}{C} \right)^2 * \left( \frac{V_b}{C_b} \right)$$

Dónde

$L_1$ = Distancia entre paradas, patrón con detenciones en todas las cuadras

$L_2$ = Distancia entre paradas, patrón con detenciones alternadas

$V$  = Volumen vehicular en carril adyacente (veh/h)

$C$ = Capacidad vehicular en carril adyacente (veh/h)

$V_b$  = Volumen de ómnibus en carril de ómnibus (buses/h)

$C_b$  = Capacidad de ómnibus en carril único de omnibus(buses/h)

El Cuadro 10 muestra los valores del factor  $f_s$  para un patrón de paradas divididas por línea de tres cuadras, o sea  $L1/L2= 0,33$

V/C	Vb/Cb			
	0.2	0.5	0.8	1.0
0	1.00	1.00	1.00	1.00
0.2	1.00	0.99	0.99	0.99
0.5	0.98	0.96	0.93	0.92
0.8	0.96	0.89	0.83	0.79
1.0	0.93	0.83	0.74	0.67

Cuadro 10: Factor  $f_s$ .  
adaptado de E 27-20 del MC 2000

Al aumentar el volumen de ómnibus en el carril aumenta la probabilidad de demoras por cola de ómnibus para ingresar a sus dársenas de carga y/o por maniobras de entrecruzamiento y sobrepasos. El factor de ajuste por interferencias " $f_b$ " refleja este efecto, y sus valores típicos según datos de campo incluidos en el Manual se muestran en el Cuadro 11.

Vb/Cb	<0,5	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
$f_b$	1,00	0,97	0,89	0,81	0,69	0,52	0,35

Cuadro 11 Factor de ajuste por interferencia entre ómnibus  $f_b$ . Fuente: adaptado de E 27-21 del Manual de Capacidad 2000

#### 4. Adaptación a condiciones locales

A efectos de caracterizar las variables locales se realizaron relevamientos de campo de tiempos de viaje de omnibus, en varias líneas de la ciudad de Córdoba. Los relevamientos se efectuaron en días laborables en horario pico de circulación del tránsito en el microcentro, que resultaron ser entre las 11 y las 13 hs, según datos obtenidos de los detectores del Sistema Centralizado de Control de Semáforos de la Municipalidad de Córdoba. Las mediciones se efectuaron con operadores que viajaron a bordo de los ómnibus registrando el tiempo en cada oportunidad que el vehículo se detenía. Además consignaban también si el motivo de la detención era por cumplimiento de paradas (ascenso y/o descenso de pasajeros) o por motivos inherentes al tránsito (semáforos y otros).

Fuera del centro los carriles de ómnibus en Córdoba son de tránsito mixto, pero en el centro las avenidas tienen dos o más carriles selectivos y hay tramos de calles enteras selectivas para ómnibus, aunque también se permiten taxis y otros vehículos autorizados. Este caso sería asignable al carril tipo 2 del Manual, como carril único exclusivo para ómnibus con uso del carril adyacente de tránsito restringido, ya que en tramos de avenidas con carriles selectivos, se prohíbe el giro a la derecha del tránsito general.

Fuera del centro los ómnibus paran a demanda en todas las paradas, que se ubican en general a distancias de 200m. En el área central de Córdoba, se utilizan patrones de salteo (skip stop operation). Las cuadras del centro tienen en general distribuidos tres o cuatro postes para servir las distintas líneas, en tanto las líneas tienen paradas programadas cada tres cuadras, lo que conforma un patrón de paradas dividido en tercios.

Los tiempos de permanencia, de gran incidencia en la estimación de capacidad y velocidad, en Córdoba están influenciados por el sistema de pago con cospeles precomprados, y por la normativa de ascenso por puerta delantera y descenso exclusivo por puerta trasera. Los tiempos de permanencia medio medidos en todas las paradas servidas de una vuelta están en el orden de 10 segundos, en tanto en las paradas críticas del centro los tiempos de permanencia medios son de

50 segundos, con coeficiente de variación de 0.55. La Figura 2 muestra una distribución de tiempos de permanencia en paradas del centro.

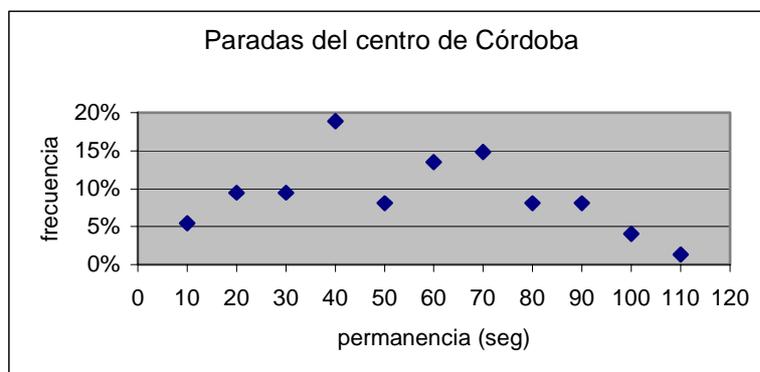


Figura 2: Tiempos de permanencia en el centro

### Tiempos base de recorrido entre puntas de línea

A efectos de desagregar la componente de tiempos de operación influenciada por las paradas de servicio ( $t_{r0}$ ) de la componente de tiempo asociada con demoras por semáforos y tránsito ( $t_{r1}$ ), se realizaron relevamientos de tiempos de viaje de ómnibus, en vuelta completa a bordo de algunas líneas, en diferentes horas del día. Con los registros de cantidad de paradas servidas, tiempos de permanencia, número de semáforos en rojo, tiempos de detención, y otros incidentes del tránsito, se pudo proceder a calcular el  $t_{r1}$ , para después estimar el  $t_{r0}$  como diferencia entre el tiempo total y el  $t_{r1}$ .

El procedimiento supone que lo medido es la velocidad básica  $S_0$  (o sea  $f_s = f_b = 1$ ), lo cuál es razonable para los recorridos entre puntas de línea, y para determinar el tiempo asignable a  $t_{r1}$  deben considerarse las demoras adicionales por decelerar y acelerar en cada detención. En el caso de vehículos livianos, la demora adicional que se incluye en la demora de control causada por semáforos se calcula con la expresión  $d_{ad} = 0,16 V_m$  (Radelat, 2003), donde  $d_{ad}$ : demora adicional por deceleración y aceleración (seg) y  $V_m$ : velocidad media de marcha (km/h). Para los ómnibus de Córdoba se realizaron mediciones en condiciones no limitadas por el tránsito, observando valores del orden de 8 segundos para frenar y 12 segundos para acelerar. Esto implica demoras adicionales del orden de 10 seg/detención, que se utilizaron para desagregar el componente  $t_{r1}$  del tiempo total de viaje y obtener los valores de  $t_{r0}$ .

El Cuadro N° 12 presenta valores medios calculados de  $t_{r1}$  y  $t_{r0}$  en tramos de ida y de vuelta de distintas líneas. Las demoras por tránsito  $t_{r1}$  están entre 0.3 y 0.7 min/km, próximas al rango 0.4 - 0.9 min/km propuesto por el Manual de Capacidad para carriles comunes con tránsito mixto fuera del centro. Como en estas estimaciones está incluida el área central, si bien su incidencia es menor al 20% de los tramos, su ponderación disminuiría el  $t_{r1}$  medido fuera del centro.

Línea	T paradas serv.(seg)	paradas serv./km	$t_{r,1}$ calculado (min/km)	$t_{r,0}$ calculado (min/km)	$t_{r,0}$ Manual(*)
C1i	8.3	1.5	0.7	2.3	1.56
C1v	10.2	2.7	0.5	2.6	2.14
R6 i	9.5	1.6	0.5	2.1	1.65
R6v	9.5	1.9	0.4	2.5	1.78
A2i	8.0	2.0	0.5	2.5	1.75
A2v	5.7	1.4	0.6	2.1	1.46

N2 i	8.5	1.1	0.3	1.9	1.42
N2 v	8.2	1.5	0.3	2.1	1.56
R8 i	8.5	1.0	0.6	2.5	1.37
R8 v	16.0	2.6	0.6	2.9	2.36

Cuadro N° 12: tiempos  $t_{r1}$  y  $t_{r0}$  entre puntas de línea  
 (\*) Estimados del Cuadro 27-18 HCM 2000.

Valores de  $t_{r1}$  locales menores a los del Manual resultan consistentes con las conclusiones sobre capacidad y nivel de servicio en calles urbanas de Córdoba realizadas por este grupo de trabajo (Galarraga J, 2001b). En cambio los tiempos base de recorrido  $t_{r0}$  obtenidos a partir de las mediciones, asociados al número de paradas por kilómetro y al tiempo de permanencia por parada, tienden a ser mayores a los valores presentados en el Manual de Capacidad (Cuadro 27-18). Para establecer un cuadro de  $t_{r0}$  análogo al Manual con valores locales, se consideró que una vez definido el número de paradas/km (aceleraciones y deceleraciones) y el  $t_{r0}$  para un tiempo de permanencia dado, los  $t_{r0}$  para otras permanencias son una función lineal exacta, que por cada segundo extra de tiempo de permanencia suma  $n$  segundos al  $t_{r0}$ , siendo  $n$  el número de paradas/km. Utilizando más valores de  $t_{r0}$  obtenidos de subdividir los tramos en secciones, se aplicó un criterio de proporcionalidad para convertir los tiempos asociados con fracciones de paradas/km en tiempos asociados con números enteros de paradas/km, y se normalizaron todos tiempos medios de permanencia a 10 segundos, calculando el  $t_{r0}$  promedio para los casos de 1-2 y 3 paradas/km. La Figura 3 muestra los resultados que reflejan los tiempos base de recorrido medidos en Córdoba. Dado que se disponía de relevamientos para las líneas 185 y 105 de Montevideo se empleó similar procedimiento estimando un  $t_{r0}$  promedio de 3 min/km para 3 paradas/km con tiempo de permanencia de 10 seg, es decir ligeramente superior al valor obtenido para Córdoba.

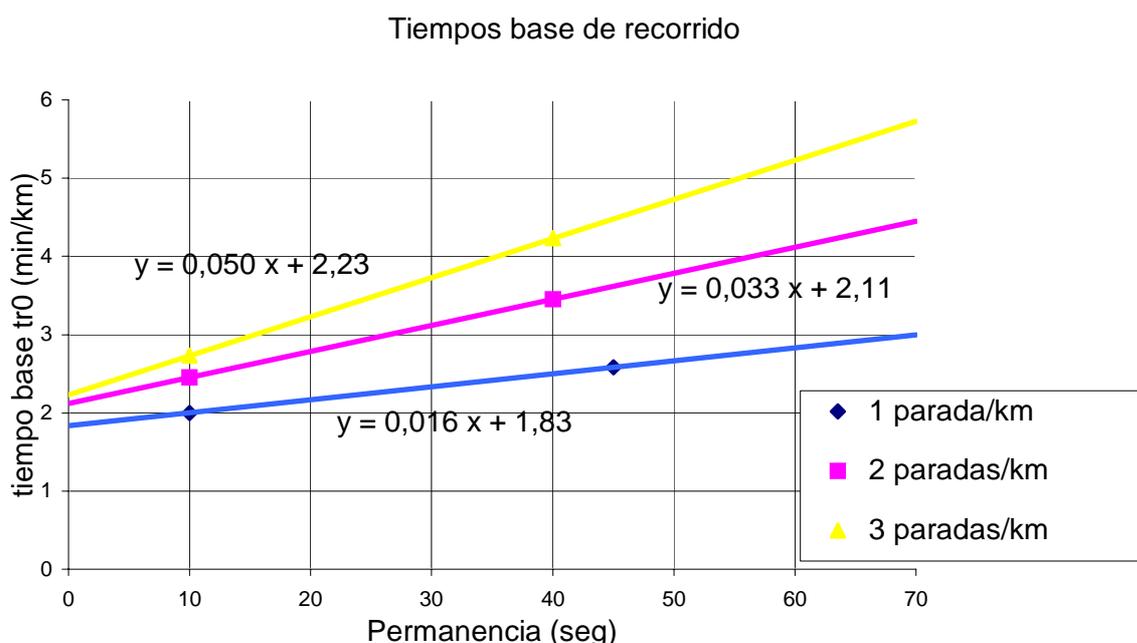


Figura 3: tiempos base de recorrido ( $t_{r0}$ ) entre puntas de línea

La ordenada al origen obtenida para los casos de 1, 2 y 3 paradas/km puede interpretarse como el tiempo de recorrido efectuando las detenciones programadas en las paradas pero con cero permanencia. Estos valores se comparan en el Cuadro 13 con los análogos derivados del Manual de Capacidad

Paradas/km	Córdoba		HCM	
	tr0 (min/km)	V (km/h)	tr0 (min/km)	V (km/h)
1	1.83	32.8	1.22	49.2
2	2.11	28.4	1.49	40.3
3	2.23	26.9	1.79	33.5

Cuadro 13: Comparación tiempos base de recorrido (permanencia 0 seg.)

Se observa que las velocidades locales en el caso de una parada/km son un 33% inferiores que las presentadas en el Manual, y la diferencia se reduce a un 20% en el caso de 3 paradas/km, lo cuál tiende a sugerir que la velocidad libre sin paradas, es menor en Córdoba. Dado que las mediciones efectuadas reflejan la suma de los tiempos ( $t_{r0} + t_{r1}$ ), y que se han estimado valores de  $t_{r1}$  inferiores y valores de  $t_{r0}$  superiores al Manual, se consideró conveniente verificar que los  $t_{r0}$  resulten independientes de las variaciones de los  $t_{r1}$ . Para ello se realizaron mediciones en el centro, con el objetivo de calcular la ordenada al origen de  $t_{r0}$  en condiciones de altos valores de  $t_{r1}$

#### 4.2. Velocidades en el centro

El caso analizado corresponde a un tramo de 1000 m de la calle San Jerónimo - 27 de Abril, que pasa por la plaza principal, exclusivo para ómnibus y taxis, con tránsito del orden de 150 ómnibus/h y donde todas las líneas tienen dos paradas. El Cuadro 14 muestra los valores medios de siete líneas tomadas en tres recorridos del tramo en condiciones de fricción y grado de saturación que permiten asumir que  $f_b \sim f_s \sim 1$

Tramo central de 1 km con 2 paradas	tiempo total (min)	tiempo permanencia parada (seg)	$t_{r,1}$ calculado (min/km)	$t_{r,0}$ calculado (min/km)	$t_{r,0}$ Manual(*)
A2	5.1	36	2.1	3.0	2.7
N1	5.4	35	2.3	3.1	2.7
CV	7.8	90	2.4	5.4	5.0
E2	4.8	42	1.0	3.8	2.9
CE	6.4	60	2.5	3.9	3.5
N4	5.2	41	1.9	3.3	2.8
CA	6.9	66	2.1	4.8	3.7
Promedio	5,9	53	2,0	3,9	3,3

Cuadro 14: tiempos  $t_{r1}$  y  $t_{r0}$  en el centro

(\*) Estimados del Cuadro 27-18 HCM 2000.

Como todos los casos corresponden a dos paradas/km con los valores medios de  $t_{r0}$  y tiempo de permanencia y con la pendiente correspondiente (0,03333 x) se calculó la ordenada al origen, resultando un valor de 2,13 min/km, muy similar al obtenido entre puntas de línea (2,11), como muestra la Figura 4.

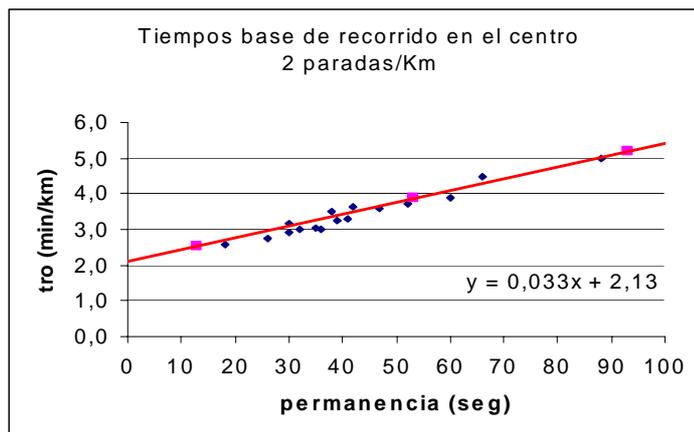


Figura 4: tiempos base de recorrido ( $t_{r0}$ ) en el centro

## 5. Análisis de una calle urbana en el centro de la ciudad. Simulación con el modelo NETSIM (TSIS)

Los modelos de simulación microscópica de tránsito permiten analizar una variedad de situaciones que se pueden presentar en la realidad. En particular el modelo NETSIM se utilizó en esta oportunidad por la posibilidad de incorporación de líneas de colectivos con sus correspondientes paradas y recorridos específicos y obtener medidas diferenciadas de efectividad para los ómnibus.

Como todo modelo microscópico requiere de datos para funcionar y datos para ajustar ese funcionamiento a la realidad. Para poder correr el modelo se requieren datos referidos a las características del funcionamiento de los ómnibus: recorridos, paradas, tiempos de ascenso y descenso de pasajeros, características de los vehículos, de la infraestructura, de la señalización, y de los conductores. También se deben relevar velocidades de operación como medidas de efectividad para chequear la consistencia de la simulación. Los resultados que reporta el modelo se presentan divididos por arco (tiempo de viaje en minutos, viajes), por estación de parada (colectivos servidos, tiempo de detención, tiempo durante el cual la capacidad de la parada es excedida) y por ruta especificada (tiempo medio).

De acuerdo a lo ya expresado los relevamientos se efectuaron en días laborables en horario pico de circulación del tránsito (de 11:30 a 13:00 hs). El tramo bajo estudio es parte integrante de una arteria que cruza el microcentro de la ciudad de Córdoba en sentido este-oeste. Se extiende desde la Avda. Chacabuco hasta calle Marcelo T. de Alvear (La Cañada) cruzando por siete intersecciones intermedias totalizando 1,027km. Todas las intersecciones se encuentran semaforizadas excepto la cuarta desde la Avda. Chacabuco. Los volúmenes vehiculares que circulan a lo largo de la arteria fluctúan entre 700 y 900 vph. aproximadamente. Los volúmenes de transporte de pasajeros son del orden de los 155 vph. en horas pico. Todo el tramo es de circulación restringida para vehículos particulares, ya que la misma está reservada para el transporte público masivo de pasajeros y para taxis y remises, pese a ello en los diferentes relevamientos realizados también se pudo observar la presencia de algunos vehículos particulares, la mayoría especialmente autorizados a circular.

A lo largo del tramo se presentan 19 paradas. Cada parada alberga más de una línea y en total existen 32 líneas que recorren el tramo. Cada línea realiza en el trayecto dos detenciones para ascenso y descenso de pasajeros en general espaciadas tres cuadras. Las dos primeras cuadras no tienen paradas y presentan

dos carriles de circulación, a partir de allí todas las cuadras tienen paradas de ómnibus, las siguientes tres cuentan con un carril para detención y tres carriles adicionales y las últimas tres de un carril para detención y dos carriles adicionales. A los fines de caracterizar el funcionamiento en términos del Manual de Capacidad, las cuadras 1-2 resultan de tránsito mixto, sin carriles especiales para ómnibus, las cuadras 3-5 corresponden a carriles especiales para ómnibus tipo 3 (dos carriles exclusivos, sin giros a la derecha), y las cuadras 6-8 resultan de carriles especiales para ómnibus tipo 2 (uso compartido del carril adyacente, con giros a la derecha).

El modelo requiere de la especificación de un tipo de parada. Existen 6 tipos de paradas clasificadas por la distribución del tiempo medio de servicio en parada. El Cuadro 15 presenta los valores empleados por el NETSIM. Para cada caso el modelo genera aleatoriamente un número entre 1 y 10 que define el tiempo específico para ese vehículo. Si el tiempo medio de servicio fuera de 60 segundos, la parada fuera de tipo 5, y el número aleatorio fuera 4, entonces el valor asignado de tiempo de servicio de ese ómnibus sería el 70% de 60 segundos, es decir 42 segundos.

Tipo de parada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	40	60	70	80	90	100	120	130	140	170
2	24	48	59	75	85	94	111	126	155	223
3	30	47	65	77	90	103	116	137	157	178
4	0	29	59	75	92	108	125	148	170	194
5	0	18	36	70	104	125	144	156	167	180
6	0	0	0	48	96	120	144	171	198	223

Cuadro 15: Porcentaje de tiempo medio de servicio (NETSIM)

Considerando las frecuencias de los tiempos de servicio relevados en las paradas del tramo y su coeficiente de variación se determinó que el tipo de parada 1 resultaba la más adecuada para la simulación. Las paradas 1 a 10 corresponden a las cuadras 3 a 5 y funcionan con un tiempo medio de servicio de 70 seg., en cambio las paradas 11 a 19 corresponden a las cuadras 6 a 8 y funcionan con un tiempo medio de servicio de 30 seg. Las paradas 3, 4 y 7 reciben la mayor frecuencia para un tiempo medio de servicio de 70 seg, con 20 ómnibus/hora. Por su parte la parada 13 recibe la mayor frecuencia para un tiempo medio de servicio de 30 seg, con 30 ómnibus por hora.

Se relevaron tiempos de cruce al ingreso y egreso del tramo lo que permitió la determinación de una velocidad de operación 10,5 km/h, lo cual se relaciona adecuadamente con estudios previamente realizados (citados en el apartado anterior) que arrojaron valores superiores a 11 km/h, ya que el tramo considerado en aquella oportunidad se extendía hacia sectores fuera del microcentro propiamente dicho. Se realizaron los ajustes requeridos a fin de representar adecuadamente la situación real. El tiempo medio de recorrido obtenido de la simulación fue de 6 minutos, con 1,1 minutos empleados en las dos primeras cuadras, 2,5 minutos en las siguientes tres cuadras, y 2,4 minutos en las últimas tres. Estos valores compararon razonablemente con los relevados en campaña, que fueron de 5,9 minutos para el total, 1 minutos para las cuadras 1-2, 2,6 minutos para las cuadras 3-5, y 2,3 minutos para las cuadras 6-8.

Se simuló en forma sistemática el efecto de cambio en la frecuencia de los colectivos realizando incrementos graduales. Considerando la situación actual como Caso Base se plantearon tres situaciones hipotéticas a fin de analizar el comportamiento de la velocidad en el transporte público masivo:

Caso 1: Disminución del 25% en los intervalos respecto del Caso Base, manteniendo sin variantes el tiempo de servicio en las paradas. Pretende un 33% de incremento en el flujo de ómnibus.

Caso 2: Disminución del 50% en los intervalos respecto del Caso Base, manteniendo sin variantes el tiempo de servicio en las paradas. Pretende una duplicación del flujo de ómnibus.

Caso 3: Disminución del 50% en los intervalos respecto del Caso Base, con reducción a la mitad de los tiempos de servicio en las paradas. Pretende una duplicación del flujo de ómnibus.

El Cuadro 16 resume algunos de los resultados obtenidos. El tiempo de viaje se ha segmentado en tres partes, las dos primeras cuadras (sin paradas de ómnibus), las siguientes tres (con paradas y tres carriles adicionales) y las últimas tres (con paradas y dos carriles adicionales)

	Tramo total	Cuadras 1 y 2	Cuadras 3 a 5	Cuadras 6 a 8
	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)
CASO BASE	6,0	1,1	2,5	2,4
CASO 1	6,9	1,1	2,7	3,1
CASO 2	10,5	1,4	5,1	4,0
CASO 3	6,9	1,5	2,1	3,3

Cuadro 16: Tiempos de recorrido simulados por tramos. Flujo mixto.

Una disminución de los intervalos del 25% ocasionaría un incremento en el tiempo de recorrido total del orden del 15%, elevando el tiempo de viaje a 6,9 minutos. El flujo de ómnibus alcanza los 206 vehículos por hora (33% de incremento pretendido), la capacidad de las paradas y de la calle permiten tomar la mayor demanda. En las cuadras sin paradas no se modifica la velocidad de los ómnibus. En el resto se advierte un incremento del tiempo de viaje debido a la mayor fricción del tránsito. Si el intervalo disminuyera en un 50% el tiempo de recorrido aumentaría en un 77%, elevándose a 10,5 minutos con una velocidad promedio de 5,9 km/h. Las paradas más solicitadas se encuentran saturadas, funcionando como cuello de botella de las correspondientes líneas reduciendo el ingreso de ómnibus en las cuadras con paradas a un total del orden de 260 vehículos por hora, no se puede alcanzar la duplicación pretendida que produciría un flujo de 310 ómnibus por hora.

Las interferencias entre ómnibus y con los vehículos livianos aumenta el tiempo medio de viaje en los tres tramos, pero sobre todo en el segundo que presenta los mayores tiempos de servicio y paradas saturadas. Si se mantiene la duplicación del flujo de ómnibus, pero ahora reduciendo a la mitad el tiempo medio de servicio en las paradas, se encuentra una situación en la que se resuelve la saturación del caso anterior, permitiendo tomar la demanda de 310 ómnibus por hora. Claramente se advierte aquí que la limitación de capacidad estaba en las paradas, ya que al reducir el tiempo medio de servicio se elimina el cuello de botella y la geometría de la calle resulta suficiente para absorber la mayor demanda. El

tiempo medio de viaje resulta de 6,9 minutos (similar al caso 1), disminuyendo significativamente con respecto al caso 2 en los tramos con paradas.

La Figura 5 presenta los tiempos medios de recorrido para ómnibus en todo el tramo, para los distintos casos analizados. El tránsito de automóviles se mantuvo sin variantes en todos los casos.

Tramo San Jerónimo-27 de abril

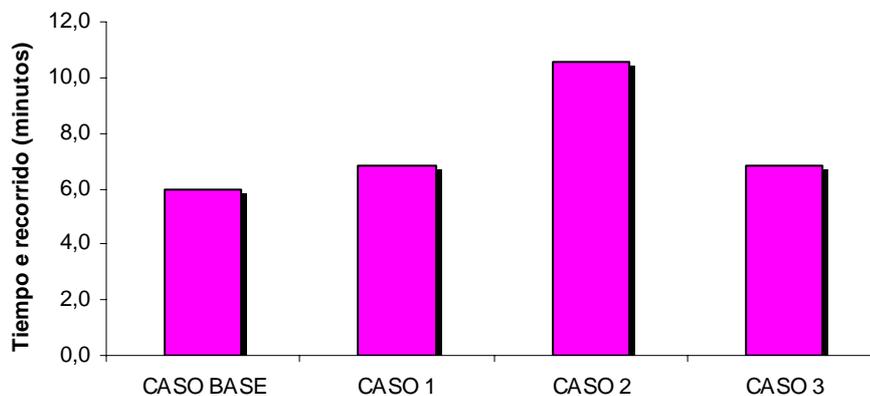


Figura 5: Tiempo medio de recorrido de ómnibus. Flujo mixto.

Para estimar el impacto que la circulación de vehículos livianos produce sobre el transporte público en la calle en estudio, se repitió la simulación de todos los escenarios eliminando el tránsito de automóviles. El Cuadro 17 resume algunos de los resultados obtenidos

	Tramo total	Cuadras 1 y 2	Cuadras 3 a 5	Cuadras 6 a 8
	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)
CASO BASE	5,1	0,8	2,4	1,9
CASO 1	5,6	0,8	2,6	2,2
CASO 2	9,4	0,8	4,6	4,0
CASO 3	4,7	0,8	1,9	2,0

Cuadro 17: Tiempos de recorrido simulados por tramos. Flujo sólo ómnibus.

La comparación de los Cuadros 16 y 17 permite advertir que el mayor conflicto con los vehículos livianos se presenta en el primer y tercer tramo. Lógicamente el Caso 2 (congestión en paradas de ómnibus) es el que presenta menores porcentajes de mejora, con un tiempo medio de viaje del orden del 90% del mismo escenario con circulación de automóviles, y el Caso 3 (mayor flujo vehicular total) es el que alcanza mayores porcentajes de mejora, con un tiempo medio de viaje del orden del 68% del mismo escenario con circulación de automóviles. En el Caso 2 la mejora se alcanza casi exclusivamente en el tramo 1 (sin paradas) y en el Caso 3 sobre todo en los tramos 1 y 3 (con mayores restricciones geométricas). La Figura 6 muestra los tiempos medios de recorrido para ómnibus en todo el tramo, para los distintos casos analizados. El flujo está compuesto solamente por ómnibus.

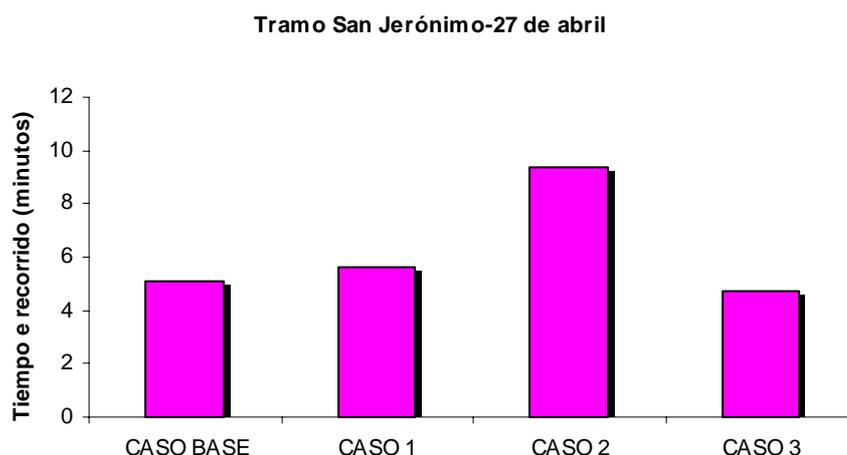


Figura 6: Tiempo medio de recorrido de ómnibus. Flujo sólo ómnibus.

## 5.2. Aplicación de la metodología del Manual de Capacidad para estimación de velocidad

Se aplicó la metodología de Manual de Capacidad 2000 para estimar la velocidad de los ómnibus en el tramo de la arteria estudiada en el centro de la ciudad de Córdoba. El primer paso de la metodología consiste en la adopción de los valores de  $t_{r0}$  y  $t_{r1}$ , es decir el tiempo base de recorrido y el tiempo de demoras por el tránsito. El  $t_{r0}$  se adoptó de 3,15 min/Km, correspondiente a 2 paradas por kilómetro con un tiempo de servicio medio de 50 segundos en cada una de ellas.

El  $t_{r1}$  se consideró diferente según el tramo de la arteria en cuestión. Para las dos primeras cuadras se adoptó 2,25 min/km (tránsito mixto), para las cuadras 3-5 se adoptó 1,05 min/km (carriles de buses sin giros a la derecha), y para las cuadras 6-8 se adoptó 1,95 min/km (carriles de buses bloqueados por el tránsito). Estos valores aplicados a los sectores dan un tiempo total de 5 minutos y velocidad básica de 12,1 Km/h. Las velocidades fueron de 17,4 Km/h para las cuadras 1-2; 10,5 Km/h para las cuadras 3-5 y 12,3 Km/h para las cuadras 6-8.

De acuerdo con la metodología del manual la velocidad final se obtiene a partir de la básica multiplicada por los factores  $f_s$  (ajuste de velocidad por operación con paradas divididas por líneas) y  $f_b$  (ajuste de velocidad por interferencia entre ómnibus). Las cuadras 1-2 (sin paradas de ómnibus) y 3-5 (con carril de sobrepaso exclusivo para buses y sin giros a la derecha) no requieren ajuste, en tanto que para las cuadras 6-8 deben considerarse los giros a la derecha, la relación  $v/c$  del carril adyacente y la relación  $v_b/c_b$  del carril de ómnibus.

Aplicando los valores correspondientes a la situación existente se obtienen coeficientes de ajuste de 0,89 para  $f_s$  y de 0,91 para  $f_b$ , lo que determinó una velocidad para las cuadras 6-8 de 10 km/h. De esta manera se alcanzó para el tramo completo un tiempo de viaje de 5,4 minutos y una velocidad media de 11,4 km/h.

El Cuadro 18 compara, para la situación actual, los tiempos relevados, simulados y estimados con la metodología del Manual de Capacidad.

	Tramo total	Cuadras 1 y 2	Cuadras 3 a 5	Cuadras 6 a 8
	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)
MEDIDOS	5,9	1,0	2,6	2,3
SIMULADOS	6,0	1,1	2,5	2,4
MANUAL	5,4	0,9	2,2	2,3

Cuadro 18: Comparación tiempos de viaje relevados, simulados y estimados

Los resultados obtenidos tienden a indicar, en concordancia a lo manifestado previamente, que los tiempos reales resultan superiores a los estimados con la metodología del manual. Un incremento en el tiempo base de recorrido ( $t_{r0}$ ) se trasladaría a todas las cuadras y aparece como una propuesta razonable para mejorar la estimación. En tal sentido el valor local reportado en el apartado anterior ( $t_{r0} = 3,75$  min/Km) permite mejorar la predicción de la velocidad media general en el caso analizado. El Cuadro 19 permite apreciar este efecto, redondeando los minutos al segundo decimal.

	Tramo total	Cuadras 1 y 2	Cuadras 3 a 5	Cuadras 6 a 8
	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Tiempo (min)
MEDIDOS	5,85	0,99	2,59	2,28
MANUAL $t_{r0}$ por defecto	5,40	0,89	2,20	2,32
MANUAL $t_{r0}$ local	5,79	1,04	2,43	2,32

Cuadro 19: Comparación tiempos de viaje relevados, simulados y estimados

#### 4. Conclusiones

El transporte público resulta de vital importancia para optimizar la eficiencia y el uso de recursos en ciudades grandes. La posibilidad de incrementar las velocidades de operación en el área central, sector servido por prácticamente la totalidad de las líneas, resulta muy atractiva ya que permitiría reducir los tiempos de vuelta, con los consiguientes beneficios tanto para usuarios como para operadores.

Los tiempos de recorrido por kilómetro tienden a disminuir a medida que aumenta la longitud del tramo considerado. En el centro se duplica la media del tiempo entre puntas de línea, pero su incidencia en el tiempo total es menor al 20%. Dado que la gran mayoría de los ómnibus cruzan el centro, el potencial de mejoras por medidas de prioridad al transporte público en el área central resulta significativo para el sistema, aunque no en la misma magnitud para cada línea.

En base a numerosos datos obtenidos se ha realizado una primera caracterización de las condiciones de operación de los ómnibus en ciudades medianas y grandes, que permite identificar el rango dentro del cual pueden mejorarse los tiempos de viaje. Los resultados obtenidos permiten caracterizar variables locales de operación de ómnibus, identificar la influencia de las paradas, las condiciones de circulación del tránsito y las intersecciones semaforizadas, sobre la velocidad del sistema de transporte público de pasajeros. Estas variables se han asociado con los componentes  $t_{r0}$  y  $t_{r1}$  del Manual de Capacidad.

En Córdoba los tiempos base de recorrido presentan valores superiores entre un 20% y un 33%, y los tiempos de demoras por el tránsito muestran una tendencia a valores inferiores a los presentados en el Manual.

Se ha implementado la modelación del transporte masivo de pasajeros, empleando NETSIM en un tramo de una calle urbana con tránsito restringido a vehículos de servicio público, con alto volumen de ómnibus (150 por hora), gran cantidad de paradas, tiempos de servicio de 30 y 70 segundos, y con tramos de diferentes geometrías. Sobre el caso base se efectuaron escenarios alternativos que muestran el funcionamiento de la arteria ante cambios en la demanda.

Se ha aplicado la metodología del Manual de Capacidad para estimar la velocidad de la calle en sectores con carriles exclusivos para ómnibus de diferentes tipos y se compararon los resultados obtenidos con los relevados y simulados. Se advirtió que los tiempos de viaje calculados por el HCM resultan menores a los medidos en campaña. El factor  $f_s$  (ajuste de velocidad por operación con paradas divididas por líneas) depende, además de las relaciones  $v/c$  (del carril adyacente) y  $v_b/c_b$  (del carril de ómnibus), del patrón de salteo de paradas ( $L_1/L_2$ ). En tal sentido el término  $L_1/L_2$ , para relaciones  $v/c$  y  $v_b/c_b$  igual a uno, debería reducir la velocidad a la correspondiente al patrón de paradas sin salteo, ya que los ómnibus deberían detenerse en todas las paradas al no poder sobrepasar. Para  $L_1/L_2 = 1/2$  el efecto es correcto, en cambio para  $L_1/L_2 = 1/3$  la velocidad se reduce mucho menos que en el caso anterior, lo que resulta contradictorio.

### Referencias

- GALARRAGA J., M. HERZ Y G. PASTOR (2001,a): *El costo de la movilidad urbana y el tamaño de la ciudad*. XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, C1-178, Buenos Aires.
- GALARRAGA J., M. HERZ, L. ALBRIEU, V. DEPIANTE (2001,b): *El Manual de Capacidad 2000 y la estimación de capacidad y nivel de servicio en intersecciones semaforizadas para condiciones argentinas*. XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, C1-180, Buenos Aires.
- HERZ M., J. GALARRAGA, L. ALBRIEU, V. DEPIANTE (2001): *Simulación de tránsito con modelos microscópicos*. XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, C1-179, Buenos Aires.
- Highway Capacity Manual* (2000) TRANSPORTATION RESEARCH BOARD  
N.R.C. Washington, D.C.
- ISIT(2005) Estudio de Transporte y Tránsito. Ciudad de San Fernando. Informe Final.
- RADELAT G. (2003): *Principios de ingeniería de tránsito*. Institute of Transportation Engineers. Washington, D.C.
- ST JACQUES K. (1997): *Operational analysis of bus lanes on arterials*. Transit Cooperative Research Program Project A-07, TCRP Report 26, Washington, D.C.
- Transit Capacity and Quality of Service Manual* (1999). Transit Cooperative Research Program Web Document Nº 6. TRB. Washington, D.C.
- TSIS- Traffic Software Integrated System*. (1998) User's Guide. Version 4.2 Federal Highway Administration, Washington, D.C